



Titre: Modélisation numérique de la crue en 2D et analyse de la
Title: propagation des polluants dans l'eau sur les bords inondés

Auteur: Joseph Abdo
Author:

Date: 2005

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Abdo, J. (2005). Modélisation numérique de la crue en 2D et analyse de la
Citation: propagation des polluants dans l'eau sur les bords inondés [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7327/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7327/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA CRUE EN 2D
ET ANALYSE DE LA PROPAGATION DES POLLUANTS
DANS L'EAU SUR LES BORDS INONDÉS

JOSEPH ABDO
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 2005



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-494-01268-4

Our file Notre référence

ISBN: 0-494-01268-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA CRUE EN 2D
ET ANALYSE DE LA PROPAGATION DES POLLUANTS
DANS L'EAU SUR LES BORDS INONDÉS

Présenté par: Joseph ABDO

En vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. VASSEUR Patrick, Ph.D., président

M. KAHAWITA René, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PRUD'HOMME Michel, Ph.D., membre

DÉDICACE

Dieu lance l'homme
dans la vie comme un caillou dans un
grand lac. Cette personne provoque, par ses
recherches vécues, des ondes d'exploration qui se propagent
vers les bords de la vérité... « Khalil Gibran »

Ce mémoire est dédié à mon père qui a quitté pour
l'autre monde, mais qui est toujours présent dans mon cœur
et mon esprit. Il me donne une motivation permanente qui m'aide
à la réalisation de mes rêves. Je n'ai que supplier Dieu
pour transmettre cette dédicace à la personne
qui me manque beaucoup et qui
occupe éternellement une
grande place au
fond de moi.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche, présenté dans ce mémoire, a été réalisé grâce aux directives de mon directeur de programme M. René Kahawita, à qui, je dois beaucoup; il m'a non seulement fait découvrir et apprécier le domaine de l'hydraulique, mais surtout donné envie d'en savoir plus. Son enthousiasme envers les recherches hydrauliques m'a impressionné et m'a fait de plus en plus aimer cette orientation. J'apprécie beaucoup ses importantes directives qui m'ont guidé à emprunter la bonne route pour arriver au but désiré de cette étude. Je l'en remercie très humblement.

Je tiens également à remercier Varvara Roubtsova qui m'a aidé dans la partie de programmation. En fait, j'estime énormément le temps qu'elle m'a accordé pour réaliser un travail professionnel dans l'exécution du programme et la présentation des résultats.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres de jury : M. Patrick Vasseur et M. Michel Prud'Homme, j'apprécie en avance leur jugement que je compterai comme un atout pour avancer de plus en plus dans le domaine de l'hydraulique.

Pour finir, je voudrais adresser ma plus vive reconnaissance à tous les membres de ma belle famille pour leur soutien moral et leur patience. Je n'oublierai jamais leurs sacrifices en passant parfois des fins de semaine et des vacances sans ma présence avec eux afin de me laisser le temps pour que ce travail soit réussi.

RÉSUMÉ

La modélisation de l'inondation des plaines a été un sujet de recherche étendue pendant les quatre dernières décennies due à son important rôle dans les dommages économiques et la perte possible de la vie des êtres humains. Ce sujet de recherche est d'intérêt significatif aux assureurs, aux municipalités et aux organismes gouvernementaux qui exigent de tracer les plans inondables pour contrôler la nouvelle construction, le développement des procédures d'évacuation de secours, le développement d'infrastructure et l'évaluation des risques.

Au début, la plupart des modèles ont employé les solutions numériques, basées sur l'application des équations unidimensionnelles de Saint-Venant qui sont appelées aussi équations d'ondes peu profondes, dans la simulation du débordement pour représenter les nouvelles limites du fleuve sur la plaine d'inondation. Ces modèles sont toujours extrêmement populaires. Toutefois la recherche récente s'est concentrée sur le développement de toutes les équations numériques de Saint-Venant, mais cette fois en deux dimensions ou en obtenant les solutions numériques avec une simple approximation cinématique de l'onde.

L'utilisation des simulations entièrement bidimensionnelles peut tout à fait exiger des ressources de calcul, en particulier, si la région couverte a un vaste domaine de calcul. Très fréquemment, la propagation d'une vague d'inondation dans un fleuve peut être confinée latéralement si par exemple elle traverse un canal creusé naturellement ou une gorge profonde. Dans telles circonstances, une simulation unidimensionnelle de la propagation d'inondation est plus qu'appropriée avec une pleine simulation bidimensionnelle étant réservée pour des secteurs exposés au risque d'inondation. Cette approche, qui traite l'écoulement comme étant unidimensionnel dans le cours d'eau principal du fleuve et le couple avec un modèle bidimensionnel dans l'analyse du débordement, peut avoir comme

conséquence un avantage distinct de calcul. Dans ce travail, le système de la modélisation d'inondation a été traité en tant que couplé au système bidimensionnel. Le cours d'eau a été analysé en utilisant un modèle numérique unidimensionnel dynamique basé sur le solveur de Riemann et couplé avec un modèle bidimensionnel de débordement basé sur une approximation des équations dynamiques simplifiées. La formulation utilisée, laisse mouiller et sécher des épisodes sur le plan inondable à traiter. En outre, pendant la courbe de récession de l'inondation, et à partir du niveau initial de la ligne d'eau avant le début de la crue, le modèle peut prévoir des zones d'accumulation d'eau après la décrue dans des dépressions topographiques du plan inondable. En raison de la version simplifiée des équations utilisées, la célérité d'avancement ou de retrait rapide n'est pas prévue d'être modelée avec précision.

La possibilité des sources de pollution dans le plan inondable (par exemple les équipements de stockage d'engrais et de pesticide, déchets industriels, etc...) étant submergé pendant l'inondation et formant des plumes de polluant, qui peuvent disperser des polluants dans les secteurs inondés, a été incorporée à la formulation. Le transport de polluant est modélisé avec l'équation d'advection- diffusion qui est désaccouplée de l'hydrodynamique.

L'application de la modélisation décrite dans cette recherche exige l'identification de deux types de données. Le premier constitue la connaissance des paramètres hydrauliques d'écoulement dans le fleuve tout en se basant sur les données des coupes transversales et la solution de toutes les équations dynamiques ainsi que les données topographiques et hydrauliques bidimensionnelles dans le plan inondable comme le coefficient de la rugosité de surface. Le deuxième type de données est constitué des propriétés physico-chimiques du polluant comme le coefficient de diffusion moléculaire.

L'exécution numérique du modèle commence par une triangulation de Delauney du plan inondable tout en considérant un état de frontière imposé avec le fleuve. Le modèle unidimensionnel du fleuve emploie généralement un état de frontière ascendant qui indique une décharge et une altitude descendant de surface de l'eau. Une tessellation de Voronoi est alors utilisée pour produire le volume de contrôle ayant une forme hexagonale en plan qui est adoptée dans l'application de la méthode proposée.

L'interpolation linéaire des données d'entrée est employée pour fournir les altitudes topographiques dans les volumes de contrôle bien qu'en principe, d'autres arrangements d'interpolation pourraient aussi être appliqués. L'échange de la décharge entre les polygones avoisinés est alors calculé sur la base de leur différence d'altitudes de la surface de l'eau en d'appliquer la relation de Manning qui est la formule de frottement la plus généralisée. (On assume que la pente de frottement est approximativement égale à la pente de surface de l'eau). La méthode prévoit alors automatiquement l'échange zéro de l'eau si les niveaux de l'eau sont égaux. Puisque les polygones sont hexagones, six différentes composantes de vitesses perpendiculaires à leurs côtés respectifs sont calculées. La vitesse au centre du polygone est alors la somme vectorielle des composantes. Le transport du polluant est modélisé comme cité précédemment, avec l'équation d'advection-diffusion mise en application sur les polygones. Un cas d'essai avec un domaine factice a été appliqué afin d'évaluer l'exactitude et l'efficacité de calcul de la méthode. Les résultats étaient tout à fait encourageants et on a décidé de modéliser un cas d'inondation qui pourrait être provoqué par une rupture de barrage. La région en question, qui est située approximativement à deux kilomètres en aval du barrage, avait déjà été étudiée dans le contexte des analyses de la sûreté du barrage en utilisant le logiciel de TELEMAC du EDF «Électricité De France» qui résout les équations bidimensionnelles. TELEMAC emploie une analyse des éléments finis qui exige énormément de ressources de calcul. Pour cette

étude de cas, on s'attendrait à ce que les effets dynamiques soient significatifs mais étonnamment, la concordance est assez bonne entre les résultats qui ont été obtenues par le modèle proposé et TELEMAC. Il s'avère que les effets dynamiques sont atténués assez rapidement pendant que la vague de montée subite propage en aval, ceci naturellement dépend fortement de la géométrie du canal. Néanmoins, on s'attend à ce que la méthode recommandée pour l'inondation provoquée par un événement graduellement variable fournisse des résultats d'exactitude suffisante.

En conclusion, la contribution principale de ce travail est la capacité de modéliser un comportement d'inondation avec une exactitude proportionnée et l'épargne significative est dans le temps de calcul. Évidemment, on s'attend à ce que l'épargne, dans les ressources de calcul, augmente rapidement avec l'ampleur du plan inondable modélisé.

ABSTRACT

Flood plain modeling has been the subject of extensive research during the last four decades due to its importance in economic damage and possible loss of human life. It is of significant interest to insure, municipalities and government agencies, which require floodplain mapping for control of new construction, development of emergency evacuation procedures, infrastructure development and risk assessment.

Initially most models used numerical solutions to the one-dimensional St. Venant shallow water wave equations, with bank storage to represent the overflow of the river onto the floodplain. Such models are still extremely popular, however recent research has focused on developing numerical solutions to the full St. Venant equations, this time in two dimensions or obtaining numerical solutions to the simple kinematic wave approximation.

The use of fully two-dimensional simulations can be quite demanding on computer resources, especially if the region covered by the computational domain is vast. Very frequently, the propagation of a flood wave in a river may be confined laterally if for example it passes through a gorge or canyon. Under such circumstances, a one-dimensional simulation of the flood propagation is more than adequate with a full two-dimensional simulation being reserved for low-lying areas at flood risk through which the river flows. This approach, i.e. treating the flow as being one-dimensional in the principal river course and coupling it with a two-dimensional model in the floodplain can result in a distinct computational advantage. In this work, the river-floodplain system has been treated as a coupled one to two-dimensional system. The principal watercourse has been treated using a full dynamic one-dimensional numerical model based on Riemann solvers coupled with a two-dimensional floodplain model based on a simplified approximation to the dynamic equations. The formulation used, allows wetting and drying episodes on the floodplain to be

treated quite easily. Furthermore, during the recession curve of the flood, as the zero depth water line retreats, the model is able to predict areas of ponding left in topographic depressions in the floodplain. Due to the simplified version of the governing equations used, the celerity of a rapidly advancing or retreating front is not expected to be modeled accurately.

The possibility of pollution sources in the floodplain (for example fertilizer and pesticide storage facilities, industrial wastes, etc.) being submerged during the flood and forming pollutant plumes that may disperse the pollutants in the flooded areas has been incorporated into the formulation. The pollutant transport is modeled with the advection diffusion equation, which is uncoupled from the hydrodynamics.

The implementation of the modeling described in this research requires the specification of two types of data. Knowledge of the flow hydraulic parameters in the river based on cross-sectional data and solution of the full dynamic equations as well as the two-dimensional topographic and hydraulic data such as surface roughness in the floodplain constitutes the first type of data. The second type of data required is the characterization of the physico-chemical properties of the pollutant such as its molecular diffusion coefficient.

The numerical implementation of the model starts with a Delauney triangulation of the floodplain under study with the river being treated as an imposed boundary condition. The one-dimensional river model generally uses a specified upstream discharge boundary condition and a downstream water surface elevation. A Voronoi tessellation is then used to generate a hexagon shaped control volume for implementation of the scheme. Linear interpolation from the input data is used to provide the topographic elevations within the control volumes although in principle, other interpolation schemes could be used. Exchange of discharge between adjoining polygons is then computed on the basis of their difference in water surface elevations and a friction formula, most commonly the Manning relation. (The friction slope is assumed

to be approximately equal to the water surface slope). The method then automatically predicts zero water exchange if the water surface elevations are the same. Since the polygons are six-sided, six different velocity components perpendicular to their respective sides are computed. The total velocity at the center of the polygon is then the vector sum of the components. Pollutant transport is modeled as mentioned earlier, with the advection-diffusion equation implemented on the polygons.

A test case with a fictitious domain was run in order to assess the accuracy and computational efficiency of the method. The results were quite encouraging and it was therefore decided to model a case of flooding that could be caused by a dam failure. The region in question, which is located approximately 2 km downstream of the dam, had been already studied in the context of dam safety analyses using the TELEMAC Software from EDF which solves the full two-dimensional equations. TELEMAC uses a finite element analysis that is extremely demanding on computational resources. For this case study, dynamic effects would be expected to be significant but surprisingly, fairly good agreement between the present model and the TELEMAC results were obtained. It appears that the dynamic effects are attenuated fairly rapidly as the surge wave propagates downstream, this of course being highly dependent on the channel geometry. Nevertheless, the method is recommended for flooding caused by a gradually varying event and is expected to provide results of sufficient accuracy.

In conclusion, the principal contribution of this work is the ability to model floodplain behavior with adequate accuracy and significant savings in computational time. Evidently, the savings in computer resources is expected to increase rapidly with the extent of the floodplain being modeled.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	IV
REMERCIEMENTS.....	V
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	X
TABLE DES MATIÈRES.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XV
LISTE DES ANNEXES	XVII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1.1 Préambule.....	5
1.2 Analyse des modèles de calcul hydraulique.....	5
1.3 Analyse des modèles de la propagation des polluants	9
CHAPITRE 2: MÉTHODE DE CALCUL DE LA MODÉLISATION DE CRUE	14
2.1 Subdivision Polygonale du plan des bords.....	14
2.2 Collecte des données	21
2.2.1 Données topographiques	21
2.2.2 Données hydrauliques	25
2.3 Identification des polygones pollués	27
2.4 Calcul géométrique	29
2.5 Calcul hydraulique	31
2.5.1 Analyse unidimensionnelle	31
2.5.2 Analyse de débordement ou découverture des bords	34
CHAPITRE 3: PROPAGATION DES POLLUANTS DURANT LA CRUE.....	41
3.1 Objectif de l'analyse.....	41
3.2 Approche et hypothèses de la modélisation	41
3.3 Méthode de calcul	43
CHAPITRE 4: APPLICATION SUR UN MODÈLE TYPE	49
4.1 Collecte des données	49

4.1.1 Levé de la topographie et du niveau d'eau.....	49
4.1.2 Traçage des coupes transversales sur la ligne d'écoulement	50
4.1.3 Traçage des axes.....	51
4.1.4 Traçage des diagonales.....	52
4.1.5 Traçage des limites de polygones.....	53
4.1.6 Présentation des données.....	54
4.1.6. A : Données du bord gauche	55
4.1.6. B : Données du bord droit	57
4.1.7 Coordonnées des points périphériques de polygones.....	59
4.2 Calcul des paramètres géométriques de polygones.....	61
4.2.1 Calcul des aires horizontales de polygones.....	61
4.2.2 Calcul des longueurs des frontières périphériques de polygones.....	61
4.3 Application numérique du calcul hydraulique	62
4.3.1 Analyse unidimensionnelle	62
4.3.2 Analyse de débordement ou découverture des bords	62
4.3.3 Analyse de la propagation des agents polluants par la crue	67
4.4 Résultats des simulations	72
4.5 Interprétation des résultats	75
CHAPITRE 5: APPLICATION SUR LA RIVIÈRE SAINTE MARGUERITE.....	80
5.1 Présentation du cas	80
5.2 Données et paramètres de la simulation.....	80
5.3 Résultats des simulations	83
5.3.1 Résultats de la méthode de cette étude.....	83
5.3.2 Résultats de TELEMAT.....	86
5.4 Comparaison et Interprétation des deux Résultats	87
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	93
BIBLIOGRAPHIE.....	95
ANNEXES	957

LISTE DES FIGURES

Figure 2,1: Subdivision avec le logiciel Argus	15
Figure 2,2: Subdivision à partir d'une répartition quelconque des noeuds (triangulation Delaunay)	16
Figure 2,3: les limites du polygone 1 en fonction de la forme des 4 parallélogrammes limités par les points (A, B, C, D, E, F, G, H et O).....	18
Figure 2,4: La présentation des données requises sous forme des sous-matrices à partir de la matrice globale. Ces données mènent à déterminer les limites des polygones élémentaires.....	20
Figure 2,5: Modèle type de la répartition des lignes d'axes et des points d'intersection.....	22
Figure 2,6: La présentation des données correspondantes aux points sous forme des matrices globales	23
Figure 2,7: Changement de la limite eau-bord (débordement)	24
Figure 2,8: Modèle type d'une section transversale de l'écoulement durant la crue ...	25
Figure 2,9: Mode de présentation graphique et matricielle des lieux pollués.....	27
Figure 2,10: Présentation des valeurs de concentration avant le début de la crue	29
Figure 2,11: Modèle type de la construction de polygone	30
Figure 2,12: Modèle type pour le calcul des vitesses d'eau dans un polygone.....	36
Figure 2,13: Limite de l'inondation durant la crue et la décrue.....	38
Figure 2,14: Changement de la limite d'eau-bord	39
Figure 2,15: Plan de la méthode de calcul	40
Figure 3,1: Dérivation de la loi de Fick en 2D.....	45
Figure 3,2: Mode de la transmission des polluants	48
Figure 4,1: La topographie des bords et les limites initiales du cours d'eau	50
Figure 4,2: Découpage de la ligne d'écoulement longitudinal	51
Figure 4,3: Traçage des axes parallèles et perpendiculaires	52
Figure 4,4: Traçage des diagonales	53
Figure 4,5: Subdivision polygonale des bords	54

Figure 4,6: présentation matricielle du bord gauche	55
Figure 4,7: Présentation virtuelle de la subdivision polygonale symétrique appliquée sur le bord droit	57
Figure 4,8: Géométrie du polygone P1 (bord gauche)	60
Figure 4,9: Données géométriques et hydrauliques requises pour l'analyse	63
Figure 4,10: Données du polygone P13 après 6 heures de crue.....	68
Figure 4,11: Variation des limites d'eau au cours des 6 premières heures de crue.....	72
Figure 4,12: Variation des limites d'eau au cours des 6 heures de décrue.....	73
Figure 4,13: État des limites d'eau avant le début de la crue.....	73
Figure 4,14: État des limites d'eau après 6 heures de crue	74
Figure 4,15: État des limites d'eau après 6 heures de crue suivies par 6 heures de décrue	74
Figure 5,1: Région de la riviète Sainte Marguerite	80
Figure 5,2: Reliefs topographiques de la zone analysée	81
Figure 5,3: Directions des lignes d'écoulement après 1.5 h.....	84
Figure 5,4: Limite de débordement après 1.5 h.....	84
Figure 5,5: Limite de l'eau sur les bords inondés après 4 h.....	85
Figure 5,6: Limite de l'eau polluée sur les bords inondés après 5.5 h	86
Figure 5,7: Résultats de la simulation faite par TELEMAT	87
Figure 5,8: Résultats à la section 1 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h).....	88
Figure 5,9: Résultats à la section 2 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h).....	88
Figure 5,10: Résultats à la section 3 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h)	89
Figure 5,11: Résultats à la section 4 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h)	89
Figure 5,12: Variation de la ligne d'eau au cours de la simulation.....	90
Figure 5,13: Développement du niveau d'eau dans le polygone-source de pollution par rapport aux sections 2 et 3 (au cours de 5.5h)	91

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : VALEURS DU COEFFICIENT DE RUGOSITÉ (MANNING)	98
ANNEXE B : RÉSULTATS DE LA SIMULATION DE CRUE APRÈS 2 HEURES	99
ANNEXE C : RÉSULTATS DE LA SIMULATION DE CRUE APRÈS 4 HEURES	100
ANNEXE D : RÉSULTATS DE LA SIMULATION DE CRUE APRÈS 6 HEURES	101
ANNEXE E : RÉSULTATS DE LA SIMULATION APRÈS 8 HEURES	102
ANNEXE F : RÉSULTATS DE LA SIMULATION APRÈS 10 HEURES	103
ANNEXE G : RÉSULTATS DE LA SIMULATION APRÈS 12 HEURES	104

INTRODUCTION

Dans le cadre de la prise des mesures préventives qui atténuent les dommages causés par le débordement de l'eau du fleuve sur les rives, la modélisation de l'inondation a été un sujet de recherche étendue depuis environ quatre décennies. Les premières simulations ont été basées sur les solutions numériques unidimensionnelles de Saint-Venant. Ces modèles sont toujours utilisées. Pourtant, les recherches récentes se sont concentrées sur le développement de toutes les équations bidimensionnelles de Saint-Venant avec une simple approximation cinématique de l'onde générée par la variation du débit en amont de l'écoulement.

Dans cette étude, on vise à calculer les paramètres hydrauliques et analyser la propagation des polluants sur les plans inondables. Cette recherche se fait dans le cadre d'un développement du logiciel de calcul «KIMBULA» qui analyse les cas où les effets dynamiques sont faibles sur le comportement d'écoulement des eaux débordées. Il s'agit de coupler une analyse 1D de l'écoulement situé à l'intérieur des limites initiales de la rivière où les effets dynamiques sont considérés, avec une analyse en 2D du débordement et de la propagation des polluants sur les rives inondées où les effets dynamiques sont négligés.

Dans certains cas, un calcul unidimensionnel s'avère fiable et suffisant pour analyser la plupart de la longueur de rivière. Dans cette situation, on peut effectuer une analyse en 2D sur les bords inondables en suivant la méthode des volumes de contrôle développée par cette recherche. Le seuil critique de l'application de cette méthode est fonction de notre hypothèse concernant la valeur du nombre de Froude qui affecte l'équation de quantité de mouvement. La valeur critique acceptable de ce paramètre reflète la résolution minimale permise pour cette modélisation. Le développement de l'équation qui

correspond à cette condition est expliqué dans la présentation de l'analyse unidimensionnelle (paragraphe 2.5.1).

L'avantage principal qu'on peut récolter de cette méthode est qu'elle offre un modèle de calcul à faible coût surtout dans les régions qui présentent des domaines vastes où le temps de réponse entre le point du départ et d'arrivée est assez élevé à cause d'une lente vitesse d'écoulement.

En termes de données, cette modélisation se base principalement sur les paramètres topographiques et hydrauliques et la connaissance des propriétés physico-chimiques du polluant trouvé sur les bords et qui risque de se propager par le fait de l'inondation. De plus, cette approche requiert la connaissance de l'état initial de l'écoulement en termes du débit, de section transversale et de profondeur ainsi que les variations des hauteurs à chaque pas de distance Δx fixé par l'utilisateur qui doit préparer les données topographiques requises afin de pouvoir exécuter le programme mis à cette fin. C'est pourquoi, il faut effectuer, à chaque Δt , une étude unidimensionnelle de l'affluent dans la direction du cours d'eau pour déterminer les dénivellements de l'eau en fonction de la section, du périmètre mouillé et de la pente d'écoulement. Une fois celle-ci est faite, on passe à la deuxième phase de calcul qui vise à calculer les vitesses de l'eau sur les bords de l'écoulement. Ces vitesses nous permettent de déduire les débits latéraux et les niveaux finaux des sections transversales après une correction des niveaux produits par l'analyse unidimensionnelle. À noter que le calcul de la vitesse d'écoulement et la vitesse de propagation des agents nocifs permettra de déterminer les masses des polluants transmises entre les volumes d'eau situés sur la zone analysée.

Le passage de la première à la deuxième phase se répète à chaque Δt pour pouvoir fixer le niveau instantané de l'eau à chaque point d'analyse. Pour ce faire, il s'agit de tracer un réseau des lignes parallèles et perpendiculaires

à la direction de l'eau. La direction de l'eau est désignée par la limite engendrée par l'intersection de l'eau avec le bord de l'écoulement. À noter aussi que les distances qui séparent les lignes perpendiculaires peuvent être les mêmes que celles fixées lors de l'étude unidimensionnelle; chacune de ces distances est égale à Δx utilisée dans le calcul unidimensionnel. Pourtant les distances entre les lignes parallèles sont fixées en fonction des courbes de niveau de la région en étude. Il est toujours possible d'adopter un espacement homogène entre les lignes parallèles et perpendiculaires et ceci pour faciliter le dessin et le calcul des aires d'influence qui correspondent à chaque point d'intersection entre les lignes croisées. Cette répartition est alors soumise à la volonté de l'utilisateur qui doit tenir compte, le plus possible, les reliefs topographiques car plus les courbes de niveau sont affinées et prises en considération, plus la résolution de la simulation faite est proche du comportement réel du cours d'eau. Le réseau des lignes tracées permet de dessiner le pourtour du polygone qui forme la zone d'influence à chaque point d'intersection entre les lignes perpendiculaires et verticales. La méthode utilisée pour le traçage des frontières du polygone sera décrite dans la section de la subdivision polygonale du chapitre 2.

Quant à la méthode de calcul des paramètres hydrauliques, elle s'applique à chaque Δt entre le point centroïde du polygone et les points qui l'entourent. On note que le mode de calcul adopté est celui recommandé par les formules de l'écoulement à surface libre comme les équations de Saint Venant et de Manning. La pente de la ligne d'eau est le facteur principal qui déclenche la transmission d'eau entre deux points. C'est pourquoi, la vitesse est nulle lorsque la pente d'eau est nulle. En somme, on peut alors déterminer la variation du niveau d'eau à chaque point du maillage en appliquant tout simplement le concept de la conservation de masse qui considère que le volume entrant égale au volume sortant plus ou moins la variation du volume produit à l'intérieur du polygone analysé. Il est primordial ici d'attirer l'attention

que ce moyen de calcul permet à l'eau qui entre dans les cuves naturelles de rester sous forme de flaque après la décrue, et ceci à cause de la topographie du pourtour qui crée une sorte de réservoir naturel. Il est indispensable de dire que la méthode appliquée dans cette modélisation ne peut pas être utilisée dans les cas où les effets dynamiques sont importants comme, par exemple, le cas d'une avalanche de boue.

Sur le plan environnemental, on peut profiter de cette méthode pour évaluer les limites de propagation des polluants dans l'eau durant la crue. Pour ce faire, il faut que les propriétés physico-chimiques du polluant soient données et les zones équivoques soient bien identifiées en avance afin de pouvoir identifier les volumes qui y entrent comme affectés du fait de leur passage dans cette région polluée. Pour effectuer ce type de calcul, on aura alors à définir les polygones qui se situent dans les zones qui risquent de résulter en une dissolution ou une suspension des produits nocifs dans l'eau. Cette étape sera suivie d'un calcul de la vitesse de propagation des polluants dans l'eau dans toutes les directions, ce qui nous aboutit à prévoir la limite d'expansion des eaux affectées. Le processus complet de cette analyse sera détaillé dans le chapitre 2 de cette étude.

La méthode de la modélisation proposée dans le cadre de ce travail pourrait alors être utilisée pour plusieurs fins. On peut l'exploiter dans les évaluations de risque d'inondation sur les bords des cours d'eau où la nature topographique présente des pentes plates et des dénivellements relativement faibles entre les courbes de niveau. De même, on peut en profiter lors de la conception d'un déversoir de barrage, car elle nous permet de vérifier les débits à évacuer lors de l'augmentation relativement rapide de la hauteur d'eau dans le bassin d'adduction.

CHAPITRE 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Préambule

Le but principal de ce type de recherches vise essentiellement à gérer adéquatement les risques et les conséquences produits par le débordement de l'eau sur les bords. Ceci exige de faire une analyse bidimensionnelle du mouvement d'eau en termes de vitesse et de débit. À noter qu'en défilant les articles qui traitent le sujet de l'écoulement en 2D, on peut distinguer que la majorité s'accorde sur la subdivision de la région étudiée en des éléments ou en volumes finis.

Quant à l'analyse de la transmission des agents nocifs dans l'eau débordée, on note que la modélisation numérique de l'écoulement d'eau sur les zones de débordement forme une base nécessaire pour effectuer la modélisation de la propagation des polluants dans le fluide d'inondation. On éclairera, dans cette bibliographie, sur une approche récente, basée sur les principes et les théories fondamentaux de la propagation des polluants, qui est adoptée et utilisée pour simuler la dissolution et la suspension des polluants dans les cours d'eau à partir d'un point source des matières nocives.

1.2 Analyse des modèles de calcul hydraulique

Bien que l'histoire des recherches hydrauliques destinées à la modélisation de crue remonte à une date relativement ancienne, les études menant à des méthodes bien définies en terme de décomposition en des formes géométriques de la région analysée sont rares. Parmi ces études, on cite celle faite par *Casulli V. et Stelling G.S (1998) "Numerical simulation of 3D*

quasi-hydrostatic, free surface flows" publiée dans le "*Journal of Hydraulic Engineering*" - No.7 - pp. 670 - 686. Cette étude suggère une subdivision rectangulaire de la région étudiée et propose une méthode des volumes finis pour le calcul des débits selon les axes x et y .

On cite aussi une méthode pareille proposée par *Akhilesh Kumar Jha, Juichiro Akiyama, et Masaru Ura* dans leur article (2000) "*Flux-Difference splitting Schemes for 2D Flood Flow*" publié dans le "*Journal of Hydraulic Engineering*". Dans cette étude, une représentation matricielle des paramètres hydrauliques est associée aux éléments unitaires volumiques. Cette présentation caractérise le mode de calcul utilisé. Cette méthode a permis de déterminer les vitesses dans deux directions horizontales (u , v). C'est pourquoi, on trouve que la subdivision géométrique résultante possède une forme cubique tel un prisme rectangulaire

De même, et dans le contexte du projet *CADAM*, un nouveau code de calcul 2D est développé et appliqué sur le fleuve *Toce en Italie*. Ces codes sont publiés en 2003 dans le "*Journal of Hydraulic Research*", article - "*Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels*". L'algorithme de ces codes est obtenu par la discrétisation spatiale des équations en eau peu profonde, avec une méthode de volumes finis basée sur l'approche de *Godunov* avec une utilisation du solveur de *Riemann*.

On observe qu'il existe d'autres études faites sur ce sujet dans les Pays Bas, mais malheureusement elles ne sont pas encore publiées.

En général, les régions soumises aux risques d'inondation sont plates. C'est pourquoi, on remarque que le modèle de Saint-Venant est souvent le modèle le plus utilisé pour effectuer une modélisation d'un écoulement à surface libre sur des pentes faibles. Ce modèle est également appelé "modèle des eaux peu profondes", ou "équations d'ondes longues". Par rapport au modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) dans le plan horizontal, il découle de l'intégration verticale sur la profondeur

des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) en posant différentes hypothèses fondamentales dont celle de la pression hydrostatique (ou ondes longues). L'intégration latérale des équations de Saint-Venant produit le modèle unidimensionnel (1D). On attire l'attention que l'hypothèse de pression hydrostatique limite l'applicabilité du modèle de Saint-Venant aux situations exemptes de ruptures de la topographie ou du niveau d'eau (chutes, ressauts hydrauliques).

Le modèle de Saint-Venant apparaît sous deux formes fondamentales quand on considère ses variables d'état :

- la forme conservative qui s'appuie sur le niveau d'eau en guise de pression et sur les composantes en (x, y) du débit spécifique (q_x, q_y) pour le mouvement de l'eau ;
- la forme non conservative qui utilise également le niveau d'eau pour la pression mais traite le mouvement à l'aide des variables primitives de vitesse (u, v) .

On introduit ci après les équations décrivant le modèle bidimensionnel de Saint-Venant dans sa version conservative. Celles-ci décrivent en premier lieu la conservation du débit (équation de continuité) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad \text{avec} \quad q_x = uH \text{ et } q_y = vH$$

Cette relation qui décrit l'équilibre entre le transfert du débit et l'évolution du niveau d'eau est accompagnée des équations régissant l'équilibre des forces et des accélérations (équations du mouvement).

Dans cette recherche, on se sert de l'application des équations de Saint-Venant pour effectuer la première phase de l'analyse du mouvement d'eau entre les sections verticales identifiées au début de la modélisation sur le long du cours d'eau de la région simulée. Cette phase précède le calcul des débits

latéraux qui permettront de corriger, à la fin de chaque pas du temps Δt , les niveaux d'eau dans les cellules situées entre les sections mouillées.

Quant au calcul des débits latéraux, il était indispensable d'adopter la subdivision géométrique des plans de bords. Cette subdivision qu'on a proposée sous forme polygonale afin de générer plusieurs lignes d'écoulement correspondant à un seul point. Cette approche est inspirée des modélisations numériques faite selon la méthode des volumes finis en 2D. Mais pour ce faire, il nous faut une identification géométrique et hydraulique des points qui limitent les lignes de l'écoulement entre le centre du polygone analysé et les centres des polygones voisins. Dans cette optique intervient le traçage des lignes d'écoulement qui découlent de la subdivision géométrique de la région étudiée. Cette subdivision part de la méthode de triangulation de Delaunay, mais avec une quelques hypothèses dont le but est de faciliter le processus de calcul. Ces hypothèses sont expliquées dans la section de la subdivision polygonale du chapitre 2 de ce mémoire.

La triangulation de Delaunay nous offre la possibilité de faire une subdivision significative en terme de répartition géométrique, et ceci, selon *Renka R. L. "Algorithm 624: Triangulation and interpolation at arbitrarily distributed points in the plane"*. Mais le problème des collections arbitraires de triangulation se produit fréquemment dans la technologie et les exemples incluant la génération de maille pour l'analyse des éléments finis et la construction de la découpe des surfaces.

Pour décrire la construction des triangulations de Delaunay (Charles Eugène Delaunay, mathématicien Français 1816-1872), il est recommandé de considérer la tessellation correspondant de Dirichlet. La tessellation de Dirichlet divise le plan limité par les points de contour en collection de régions polygonales dont les frontières sont les médiatrices perpendiculaires des lignes joignant les points de repères voisins.

La triangulation de Delaunay, qui correspond à la tessellation de Dirichlet, est construite en reliant tous les points de repères qui partagent une frontière de polygone. En général, les sommets de tessellation de Dirichlet se produisent où trois polygones adjacents se rencontrent. Donc, les trois points de repères liés à chacune de ces polygones forment un triangle de Delaunay. Chaque sommet d'une tessellation de Dirichlet est équidistant à chacun des trois points de repères formant le triangle de Delaunay. Ainsi, chaque sommet de tessellation de Delaunay est uniquement associé à un triangle de Delaunay et est situé à son centre. Quand la triangulation de Delaunay est complète, ceci signifie qu'aucun point de repère ne peut se trouver qu'à l'intérieur de n'importe quel triangle.

Un des avantages des triangulations de Delaunay, par opposition aux triangulations construites heuristiquement, est qu'ils évitent automatiquement de former des triangles avec de petits angles inclus lorsque c'est possible. En effet, *Green* et *Sibson* ont prouvé que les triangulations de Delaunay sont, par définition, localement équiangle (Voir pp. 21, 168 "*Computing Dirichlet tessellations in the plane*" [1978], *The Computer Journal*). En raison de cette propriété, les triangulations de Delaunay sont en particulier convenues à la génération de grille pour l'analyse des éléments finis et les algorithmes contournants.

Enfin, une fois la subdivision convenable est faite, on peut facilement calculer les vitesses des lignes d'écoulement qui correspondent à chaque polygone et on déduit par l'application de la loi de conservation de masse le changement du niveau d'eau.

1.3 Analyse des modèles de la propagation des polluants

Nombreuses sont les recherches qui ont été menées sur la modélisation numérique des dispersions de pollutions en cours d'eau. Mais ces recherches

se diffèrent par le niveau de traitement. C'est pourquoi, il est utile de mettre en relief les définitions des trois niveaux de traitement pour ce problème.

Le premier suit un modèle simple unidimensionnel. Il ne peut être utilisé que lorsque les concentrations sont supposées homogènes sur un profil en travers. En cours d'eau, cette condition est généralement vérifiée dans le champ lointain (quelques centaines de mètres, habituellement pour $L/h > 200$). Le polluant est représenté par une concentration moyenne, fonction du temps et de l'abscisse en long, qui est déterminée à l'aide d'une équation classique de convection-diffusion unidimensionnelle. À titre d'exemple, on peut se référer à Simon L. (a) [1990] ou à Rigaudière P. [1992].

Le second modèle est plus complexe et résout les équations de Saint-Venant 2D. Dans ce modèle, la pression est toujours supposée hydrostatique, mais la description est plus précise car elle fait intervenir la hauteur d'eau et les deux composantes de la vitesse moyenne (u , v) sur une verticale. La dispersion a alors un caractère bidimensionnel puisque l'homogénéisation s'est uniquement effectuée dans la direction verticale. Le polluant est modélisé par une concentration moyenne sur une verticale qui est déterminée à l'aide d'une équation de convection-diffusion bidimensionnelle. Pour plus des détails, il est possible de se référer à Bujon G. [1983] ou à Simon L. (b) [1990].

Le troisième modèle est le modèle tridimensionnel. Il rend compte de la réelle complexité du mélange qui se réalise en cours d'eau dans la zone du point éjectant des agents polluants. En effet, dans un espace court du point-source de la pollution, appelé champ proche, les pollutions peuvent présenter de fortes hétérogénéités latérales et verticales. Ce modèle se base sur une modélisation tridimensionnelle qui résout les équations de Navier-Stokes et les équations de convection-diffusion en trois dimensions. Dans notre modèle, la complexité de la turbulence ne nous permet pas de faire la résolution à une échelle plus petite que celle de la maille.

Parmi les approches, qui se basent sur le modèle tridimensionnel, figure le code numérique aux éléments finis TELEMAC 3D du laboratoire National d'Hydraulique d'EDF "*Électricité De France*" (Janin J.M. & al. [1992]) qui est utilisé pour analyser le mélange d'eaux douces et salées, la dilution thermique, la dispersion des polluants ou le transport de sédiments en suspension. Sa résolution numérique s'effectue en trois étapes : celle de la convection, celle de la diffusion et celle du calcul de la surface libre. Cette dernière est déterminée grâce à la résolution, par le code bidimensionnel de calcul. Le second exemple, qui peut être mentionné, est le modèle aux volumes finis LMT3D de Slovénie (Rajar R. & Cetina M. [1997]).

Dans cette étude, on va admettre que l'homogénéisation existe sur la surface verticale de l'écoulement dans le voisinage du point émettant les agents de polluant. Cette supposition se base sur deux éléments essentiels ; en premier, la modélisation en 3D est très coûteuse et elle n'est pas toujours justifiable excepté pour les cas qui présentent des géométries très spéciales et lorsqu'on a des courants verticaux comme les estuaires. Le second élément se base sur le fait que la vitesse du débordement, durant la crue, est lente et par conséquent, les polluants affectant le volume d'eau au-dessus du point-source de pollution ont le temps d'être diffusés verticalement et mélangés avec l'eau au niveau moléculaire. Cette opération sert à récupérer les polluants évacués horizontalement et ensuite permet de garder le degré de saturation dans le polygone qui contient la source de pollution.

L'approche type qui tient compte de la supposition d'homogénéisation verticale se réfère à la méthode bidimensionnelle de calcul qui est expliquée dans la thèse de doctorat de Nathalie BUIL [1999] (*«Modélisation tridimensionnelle du transport des polluants dans les écoulements à surface libre»* chap2, P. 50-53. Université Claude Bernard-Lyon1, Division Hydrologie-Hydraulique, unité de recherche Modélisation). Dans cette thèse, les hypothèses de départ sont :

- Les fluides sont isotropes et newtoniens ;
- Les forces de Coriolis et centrifuges sont négligées ;
- L'apport d'énergie due à la dissipation visqueuse est négligé ;
- L'approximation de Boussinesq est utilisée (fluides incompressibles mais couplés au champ de température et fractions massiques par des forces de flottabilité) ;
- Les fluides et le polluant sont considérés parfaits au niveau thermique ;
- Le polluant est mélangé au niveau moléculaire (convection et dispersion) ;
- La masse volumique ρ_0 (Kg/m^3), la viscosité dynamique moléculaire μ (Kg/m.s) et la conductivité thermique moléculaire λ (J/s.m.K) du mélange fluide-polluant sont égaux à ρ_0 , μ et λ du fluide ;
- la viscosité dynamique moléculaire μ (Kg/m.s), la conductivité thermique moléculaire λ (J/s.m.K), la chaleur spécifique du fluide C_F (J/Kg.K), le coefficient de diffusion massique moléculaire Γ_Y (Kg/m.s) et la chaleur spécifique du polluant C_Y (J/Kg.K) sont supposés constants.

Enfin, les 6 variables (3 composantes de vitesse, la pression instantanée, la température instantanée et la fraction massique instantanée du polluant $Y=C/\rho_0$) se déterminent en résolvant les 6 équations fournies par cette thèse : équation de continuité, équation de la quantité de mouvement, trois équations liées à la température et l'équation de la fraction massique du polluant.

Bien que la méthode expliquée ci-dessus est bien structurée, elle reste toujours limitée par un volume cubique ayant une direction verticale et deux directions dans le plan horizontal. Pourtant, la modélisation de la propagation des polluants sera plus proche du comportement réel si on arrive à calculer plusieurs vitesses dans différentes directions horizontales afin de tracer un spectre significatif de la propagation de polluant autour d'un point donné.

Lorsque la stratégie de notre simulation cherche à tracer un spectre avec des courbes circulaires autour des points affectés, on tient compte de toutes les directions des lignes d'écoulement. Ceci se résume par deux facteurs principaux. Le premier vise à considérer, par hypothèse, que les vitesses d'advection égalent aux vitesses horizontales calculées dans l'analyse des mouvements hydrauliques et dont les directions sont données par la subdivision polygonale. Le second facteur est le calcul des vitesses de diffusion des agents qui traversent les mêmes lignes d'écoulement déjà définies dans le calcul des vitesses d'écoulement situées dans le même polygone. Pour ce faire, les lignes d'écoulement engendrées à l'intérieur de chacun des polygones viennent ici pour implanter les directions horizontales des vitesses de diffusion et d'advection. Cette approche géométrique de la résolution du problème est inspirée de l'étude "*Numerical study of the effects of a variable density contaminant plume in an unconfined aquifer*". faite par *Fan Y., Kahawita R. & Tessier J.C.* Dans cette recherche la simulation de la transmission des polluants se fait en fonction du temps et de l'espace tout en appliquant la loi de la conservation de masse.

Bien que cette étude supposera que les volumes d'eau, situés au dessus des points définis en avance comme sources des polluants, sont toujours saturés, et ceci car la crue qui se passe très lentement, il est toujours possible de considérer la diffusion verticale dans le cas où la masse des polluants transportée horizontalement est non récupérable par la masse diffusée verticalement du sol.

CHAPITRE 2

MÉTHODE DE CALCUL DE LA MODÉLISATION DE CRUE

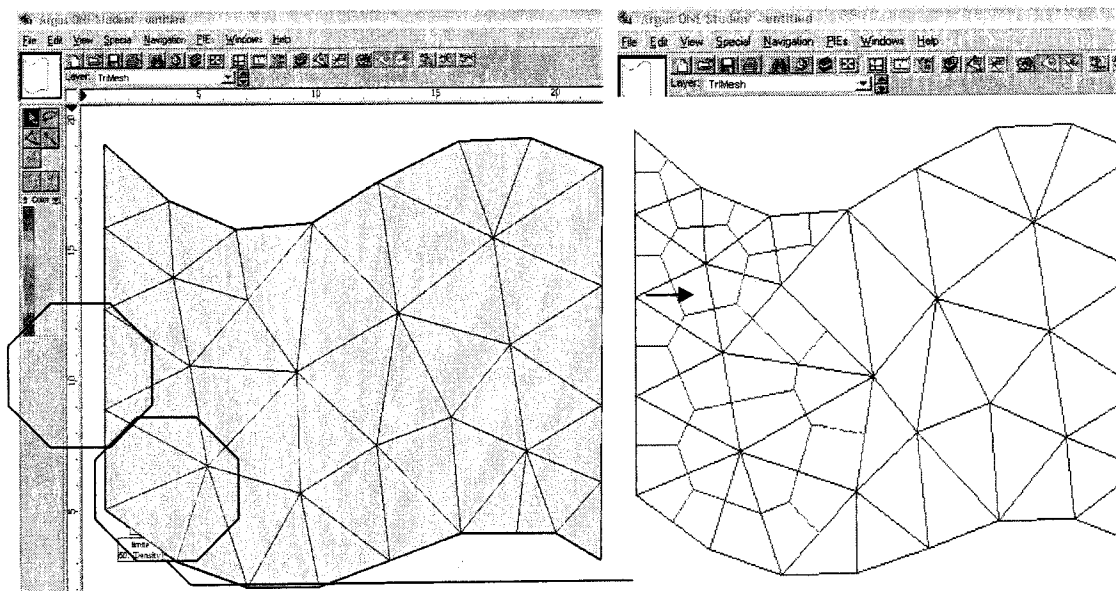
L'approche de calcul utilisé pour effectuer la modélisation de crue constitue en deux parties principales. La première est une phase de calcul géométrique pour tous les polygones produits. Et la deuxième consiste en un calcul hydraulique basé sur le développement des équations de Saint-Venant et Manning qui sont fiables lors d'un écoulement sur une pente faible comme le cas de l'inondation.

La nature de l'étude présente impose alors une stratégie logique dans le processus du traitement. Cette méthodologie constitue, d'une part, la connaissance des données réelles et requises pour lancer la modélisation, soit les données géométriques, hydrauliques des bords soumis aux risques de débordement avec une identification des lieux-sources de pollution, et d'autre part le taux de la croissance ou la décroissance du débit en amont de la rivière. C'est pourquoi, la méthode proposée pour modéliser la crue, et par conséquent, la pollution produite passe à travers trois étapes importantes avant de commencer le calcul hydraulique: soit la subdivision polygonale, la collecte des données topographiques et hydrauliques, et l'identification des polygones pollués.

2.1 Subdivision Polygonale du plan des bords

Les aires des deux bords du cours d'eau seront subdivisées en des polygones élémentaires dont la somme de leurs aires est égale à l'aire totale des bords analysés. Les polygones élémentaires sont les zones dont les niveaux d'eau se varient en fonction des échanges de débit entre leurs centres et les centres des polygones avoisinés. Le traçage de la zone d'influence, liée à chaque point, sous forme de polygone revient à

l'approximation du comportement de l'eau dans la modélisation au comportement réel sur les bords inondés. Le même concept d'analyse était adopté par Thiessen dans son étude de la précipitation moyenne des pluies reçues sur une région où plusieurs appareils de mesures pluviales ont été distribués sur plusieurs stations de la région en étude. (Voir Cline, A. K. and Renka, R.L.(1984) "A storage efficient method for construction of a Thiessen triangulation")



**Figure 2,1: Subdivision avec le logiciel
Argus**

Le modèle illustré dans la figure 2,1 a été subdivisé par le logiciel Argus qui sert, avec une de ses plusieurs fonctions, à construire un maillage triangulaire tel que le point d'intersection des trois médiatrices de chaque triangle se situe à l'intérieur de ce triangle. L'inconvénient commun, dans ce type de logiciels, est que la subdivision s'effectue en 2D (selon les axes x et y) sans tenir compte des niveaux de points. C'est pourquoi, le mode de subdivision appliqué dans ces logiciels ne satisfait pas le but principal de la modélisation car les niveaux des points sont des facteurs principaux dans l'analyse du débordement.

De même, **S. W. Sloan** a expliqué un algorithme pour la construction d'un maillage de triangles, "*A fast algorithm for constructing Delaunay triangulation in the plane*", à partir des droites joignant des points dispersés arbitrairement sur une zone donnée.

La formation du polygone ou de la zone d'influence associée à chaque point se fait en reliant les points d'intersection entre les médiatrices des triangles qui entourent le point.

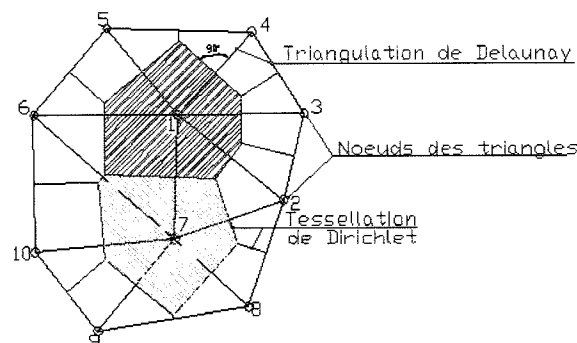


Figure 2,2: Subdivision à partir d'une répartition quelconque des noeuds (triangulation Delaunay)

Cette méthode exige parfois de subdiviser en trois triangles plus petits chaque triangle du maillage, où le point d'intersection des trois médiatrices se situe à l'extérieur de la surface de ce triangle.

Malgré que cette approche de subdivision produit une répartition tout en considérant les niveaux des points, elle porte une difficulté dans le sens de la structuration géométrique qui facilite l'exécution de calcul d'une façon simple et bien organisée; on se trouve toujours obligé d'exécuter des tests sur la répartition avant de passer à la phase de calcul hydraulique. Il s'agit donc de s'assurer que le point d'intersection des médiatrices dans chaque triangle se situe à l'intérieur du triangle car sinon il faut le subdiviser en trois nouveaux triangles. Ces tests augmentent énormément le travail géométrique qui ne doit être qu'une étape préparatoire pour déclencher l'exécution du programme de la modélisation.

Il est conclu clairement qu'avec l'approche qui recommande la répartition de la zone d'étude en des éléments finis et aussi selon l'article de S.W.Sloan, la construction polygonale des zones d'influence par les points donne des résultats acceptables et significatifs dans le cadre de la modélisation numérique basée sur la géométrie.

Dans cette étude, il était indispensable de trouver un moyen de répartition qui est facile à être appliqué et qui évite le problème d'avoir le point d'intersection des médiatrices à l'extérieur du triangle. Pour cela, l'approche de parallélisme entre les axes, dont l'application est simple, vient répondre facilement aux conditions de la subdivision imposée. L'importance de cette approche s'appuie aussi sur le fait que les mouvements de l'eau autour d'un point quelconque se font dans plusieurs directions et sens. D'où la nécessité de créer plusieurs frontières bien déterminées qui joignent le point étudié avec les points voisins.

Comme il est mentionné dans la première partie de ce chapitre « collecte des données », l'approche du parallélisme adoptée dans le traçage des axes nous offre la possibilité de fixer n'importe quel espacement Δx voulu entre les axes. On a alors d'une part, la liberté complète dans la répartition des axes et d'autre part, le choix de donner la résolution désirée à la modélisation. À noter ici que la fixation de Δx doit être en rapport avec la répartition des sections transversales de l'analyse unidimensionnelle.

Dans le cadre géométrique du polygone d'influence, le nombre maximal des cotés du polygone est de six côtés, c'est-à-dire un hexagone, ceci nous permet de créer six frontières liant le centre du polygone avec les points voisins qui sont en même temps les centres des polygones contigus. La détermination des longueurs de ces frontières permettra plus tard de calculer

les différents paramètres d'interaction entre les points du maillage (comme les débits de transport, les masses des polluants transportés, etc.)

La figure 2,3 montre les nominations qu'on a généralisées pour les 9 nœuds qui forment les points principaux pour dessiner le polygone de la zone d'influence, soit les points A, B, C, D, E, F, G, H et O. Cette répartition des nœuds est similaire pour tous les polygones.

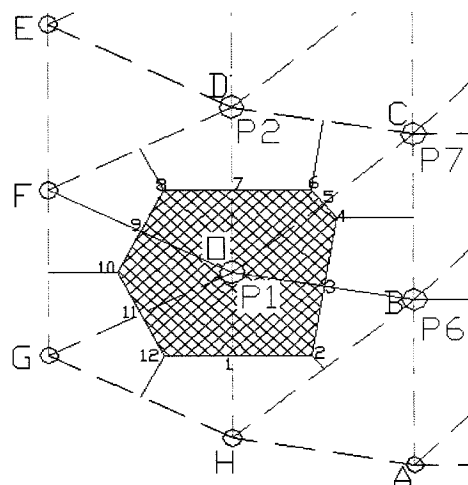


Figure 2,3: les limites du polygone 1 en fonction de la forme des 4 parallélogrammes limités par les points (A, B, C, D, E, F, G, H et O).

Pour cela, on trouve, par exemple, que les termes $Ax[1]$ et $Ay[1]$ désignent respectivement l'abscisse et l'ordonnée du point **A** lié au polygone numéro 1.

Cette façon généralisée de présenter des termes facilite l'identification des paramètres utilisés dans le calcul qui se fait pour déterminer les paramètres d'un polygone donné.

L'approche du parallélisme adoptée entre les lignes de même direction a pour but de faciliter le calcul et éviter le problème d'avoir le point d'intersection des trois médiatrices d'un même triangle à l'extérieur de l'aire du triangle. Il suffit de savoir dessiner la diagonale la plus courte dans chacun des quatre parallélogrammes (OBAH, DCBO, FOHG et EDOF, voir figure 2,4). Pour ce faire, le choix de l'un des deux diagonales dans un même parallélogramme se fait en fonction de la pente de ligne parallèle au segment du profil longitudinal de l'écoulement.

Par exemple, si la pente de la droite HA du parallélogramme $OBAH$ (voir figure 2,4) est positive $[(X_A - X_H) / (Y_A - Y_H) > 0]$, on trace les droites OA et DB et sinon on trace les droites HB et OC . De même, si la pente de la droite GH du parallélogramme $FOHG$ est positive $[(X_H - X_G) / (Y_H - Y_G) > 0]$, on trace les droites FH et EO et sinon on trace les droites OG et DF . Grâce à ces deux conditions le dessin des droites diagonales se fait automatiquement dans le programme développé pour la modélisation.

En parallèle, les segments 12-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10 et 10-12, tracés sur la figure 2,4, désignent les frontières d'interface entre les points O-H, O-B, O-C, O-D, O-F et OG. Une fois les coordonnées des points (2, 4, 6, 8, 10 et 12) sont calculées par résolution simple des formules géométriques, les longueurs des frontières se déduisent facilement en fonction de coordonnées des points qui les limitent. À noter ici que les formules géométriques utilisées pour déterminer les coordonnées des points situés sur le pourtour du polygone sont :

- $m_1 \cdot m_2 = -1$ où m_1 et m_2 sont les pentes des deux droites perpendiculaires,
- l'équation d'une droite en fonction des deux points donnés :

$$y_1 - y_2 = m (x_1 - x_2).$$

Il est indispensable de mentionner qu'après la matrice globale des points d'intersection, on sélectionne successivement des sous-matrices de taille $[3 \times 3]$ (voir figure 2,4). Ces sous matrices forment les champs nécessaires pour tracer les polygones correspondants aux points d'intersection.

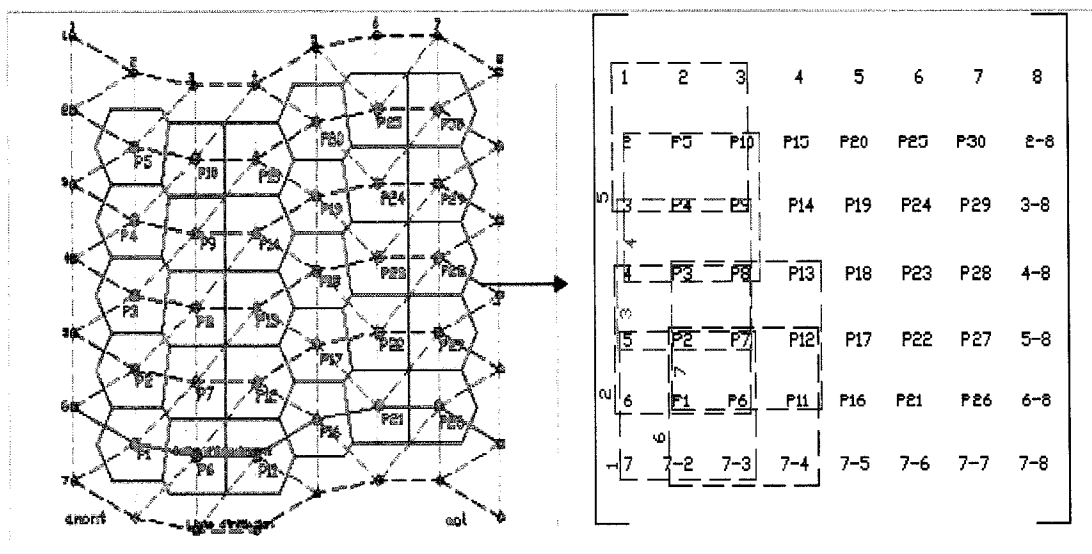


Figure 2,4: La présentation des données requises sous forme des sous-matrices à partir de la matrice globale. Ces données mènent à déterminer les limites des polygones élémentaires.

L'élément central de chaque sous-matrice correspond au centre du polygone. On note aussi que dans la matrice globale, la première et la dernière ligne ainsi que la première et la dernière colonne sont considérées comme lignes et colonnes d'initiation et ensuite les points situés sur ces lignes et colonnes ne seront plus des centres de polygones. C'est pourquoi, on trouve que le nombre des polygones est calculé par l'expression suivante:

$$N_p = (N_l - 2) * (N_c - 2) \quad \text{Où:}$$

N_p: est le nombre des polygones,

N_l: est le nombre des lignes de la matrice globale,

N_c: est le nombre des colonnes de la matrice globale.

Le classement des sous matrices suit la numérotation des polygones; on commence de l'amont vers l'aval tel qu'il est montré sur la figure 2,6.

On remarque aussi que le numéro du premier polygone situé sur la colonne suivante est égal à la somme de numéro du premier polygone de la colonne précédente avec le nombre des lignes moins deux:

$$\mathbf{NP_2 = NP_1 + NI - 2} \quad \text{Où:}$$

NP₂ : numéro du premier polygone situé sur la deuxième colonne de la matrice des polygones,

NP₁ : numéro du premier polygone situé sur la première colonne de la matrice des polygones,

NI : nombre des lignes de la matrice globale.

Cette approche facilite l'exécution du programme dans un concept logiquement défini pour établir une formulation simple dans les boucles de calcul. Cette simplicité se produit en référant les données des points du polygone analysé aux données des points dans les polygones qui l'entourent.

2.2 Collecte des données

Comme il était mentionné dans l'introduction de cette étude, nous devons collecter plusieurs types de données pour pouvoir exécuter le programme de la modélisation numérique; il s'agit des données topographiques et des données hydrauliques liées aux niveaux d'eau, limites d'écoulement et aux rugosités des surfaces soumises aux risques d'inondation.

2.2.1 Données topographiques

Ces données reflètent les reliefs géographiques de la région en étude. Elles sont caractérisées par les coordonnées cartésiennes (x, y, z) des points d'intersection du maillage créé. Ces points sont définis par les points d'intersection entre les axes perpendiculaires et les lignes parallèles au profil longitudinal de l'écoulement avec les bords.

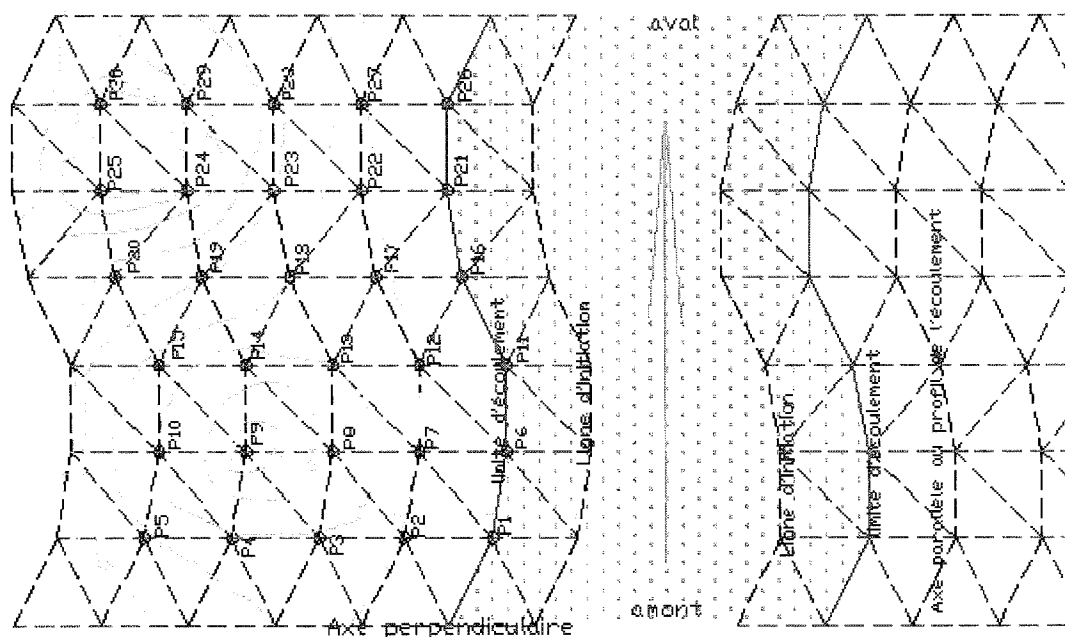


Figure 2,5: Modèle type de la répartition des lignes d'axes et des points d'intersection

La figure 2,5 ci-dessus montre un modèle type du maillage des points qui seront en même temps les centres des polygones dont les niveaux d'eau sont influencés par le déplacement des débits d'eau entre leurs centres et les centres des polygones voisins.

Pour produire ces points, on a besoin de la carte topographique qui illustre le parcours avec toutes les courbes de niveau qui décrivent les reliefs des bords. Dans le cas où le fichier informatisé de la carte n'est pas construit, la carte sera scannée puis importée et calibrée dans un fichier AUTOCAD ou autre logiciel similaire. Ensuite on trace les lignes perpendiculaires et parallèles pour faire en sorte que les lignes verticales délimitent les segments qui forment le profil longitudinal de la limite du cours d'eau avec les bords, pourtant les lignes parallèles délimitent les courbes de niveau.

Il faut faire en sorte que le réseau tracé couvre tous les détails géographiques et assure en même temps une résolution affinée du modèle topographique. Pour cela, on est intéressé à tracer un maillage tramé qui montre le plus possible tous les reliefs topographiques. Ensuite, on déduit les

coordonnées des points d'intersection avec les moyen des logiciels spécialisés à ces fins; par exemple, avec une fonction disponible dans AUTOCAD, nous sommes en mesure de déterminer toutes les coordonnées (x, y, z) des points d'intersection créés par le quadrillage dessiné et ceci en sélectionnant les points voulus puis en utilisant la fonction "list" qui donne les coordonnées cartésiennes de tous les points sélectionnés.

Une fois les coordonnées des points d'intersection sont identifiés, on peut construire une matrice globale pour chaque type d'information liée aux points; on peut alors créer une matrice des abscisses, ordonnées ou des élévations des points de la région en étude ainsi que des matrices pour toutes les autres données hydrauliques.

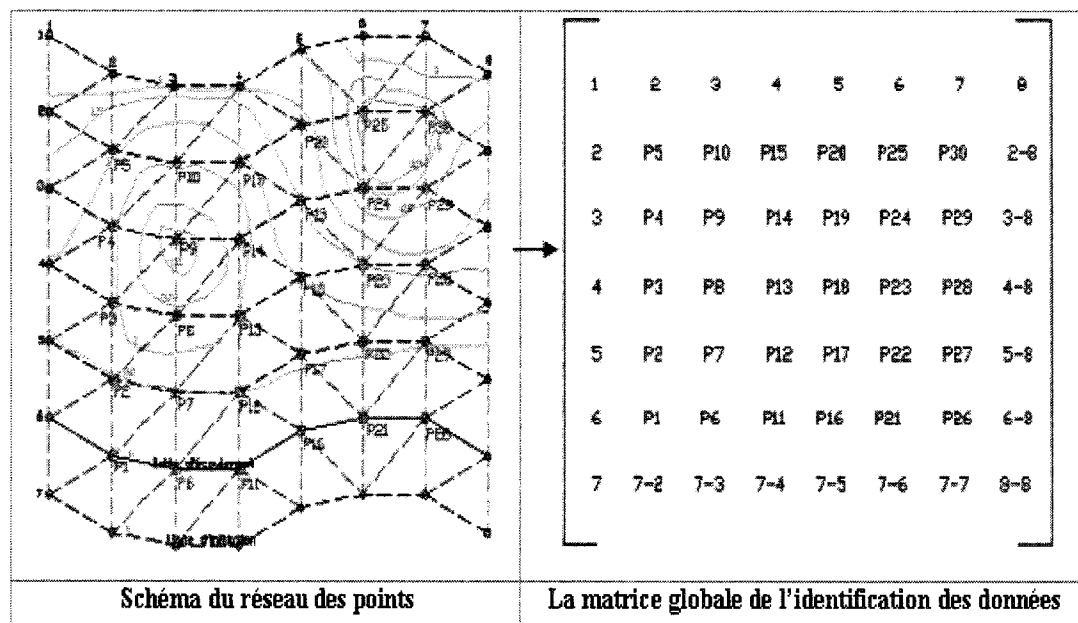


Figure 2,6: La présentation des données correspondantes aux points sous forme de matrices globales

La figure 2,6 montre l'approche de la présentation des données de la rive gauche du modèle type montré dans la figure 2,5, on trouve que les données sont présentées dans une matrice globale de taille [7 x 8] dont le nombre

d'éléments égale au nombre des points du maillage. À noter ici qu'un des rôles de ces matrices globales est d'aider à faire une visualisation schématisée de la modélisation faite selon la méthode expliquée dans le cadre de cette étude.

Quant à l'expansion des limites d'eau sur les bords, elle sera caractérisée par le changement instantané des données de la matrice globale des niveaux d'eau après chaque pas de temps (Δt). Ce changement instantané représente le comportement de la crue ou la décrue sur la région analysée en fonction de la topographie des points et les paramètres hydrauliques de l'écoulement.

On attire l'attention que le changement instantané des niveaux d'eau sur les limites eau-bord résulte un changement immédiat dans les coordonnées de ces limites sur le plan cartésien, et cela en fonction des pentes situées sur le bord de l'écoulement.

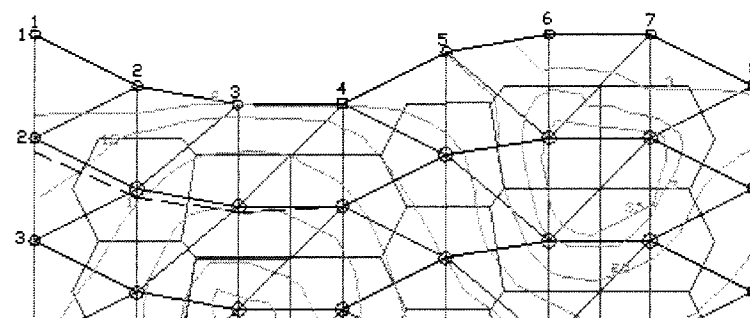
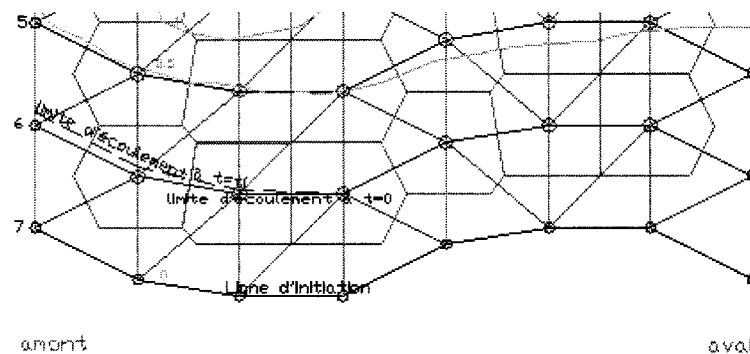


Figure 2,7: Changement de la limite eau-bord (débordement)

2.2.2 Données hydrauliques

Tout d'abord, il faut commencer par la connaissance de l'état initial d'écoulement, c'est-à-dire, il faut savoir les paramètres hydrauliques de l'écoulement à l'état initial avant le début de la crue. Ces paramètres sont le débit, la vitesse, la pente de la ligne d'eau et les données des sections transversales (Aire, périmètre mouillé, largeur superficielle et profondeur d'eau). En plus, on doit avoir en main les données qui montrent, à chaque pas du temps (Δt), les variations du niveau d'eau sur la limite initiale de l'écoulement avec les bords. Par une analyse unidimensionnelle de la section initiale d'écoulement située entre les axes verticaux qui passent par les points d'intersection avec les bords, on détermine à chaque Δt la nouvelle hauteur d'eau. La figure suivante montre un exemple de la variation du niveau d'eau dans une section transversale durant la crue.

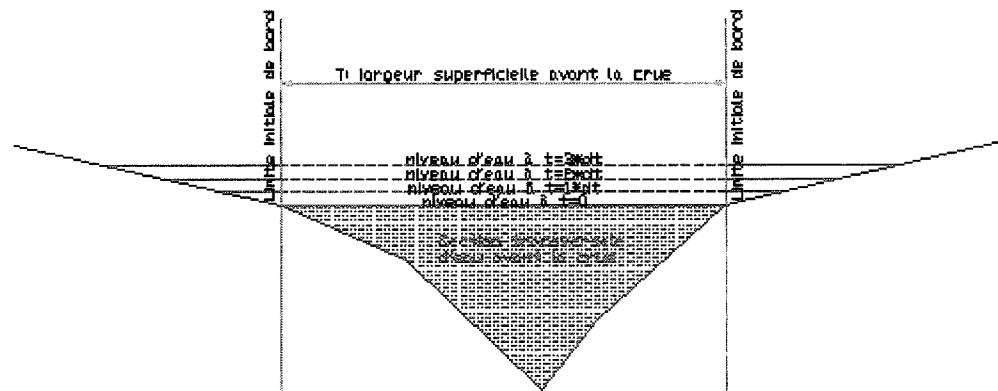


Figure 2,8: Modèle type d'une section transversale de l'écoulement durant la crue

Dans cette étude, on considère, par hypothèse, que la ligne superficielle de l'eau dans la section transversale de l'écoulement est toujours horizontale. En parallèle, et lorsque les profondeurs d'eau au dessus des points de bords

sont relativement faibles, l'intervention du coefficient de rugosité (Manning) n'est plus négligeable. C'est pourquoi, Il est nécessaire alors d'estimer avec précision les valeurs des coefficients de rugosité à chaque point du maillage produit dans l'étape de la collecte des données topographiques. Un bon chiffrage de ces coefficients exige donc de faire une campagne de collecte des données dans la région en étude afin de définir la valeur convenable à chaque point en fonction de ses caractéristiques géologiques et surfaciques. Pour cette raison, un tableau des coefficients de rugosité en fonction de la nature du sol est figuré dans l'*annexe «A»* à la fin de ce mémoire. Ce tableau aide à chiffrer le plus correctement que possible les coefficients de Manning de la région analysée.

Quant à l'écoulement de base ou l'infiltration de l'eau dans le sol, ce facteur, qui pourrait intervenir dans le comportement de la crue, ne sera pas pris en considération, car la crue passe normalement dans une période de l'année où le sol est quasiment mouillé.

Normalement, un sol mouillé admet une perméabilité plus faible que lorsqu'il est sec. De plus, et même si la nature du sol inondé a une perméabilité considérable, le débordement se passe habituellement très lentement, ce qui permet au niveau de la nappe souterraine d'eau de monter en parallèle avec l'élévation du niveau d'écoulement. À noter aussi que, durant la crue, le débit d'écoulement hypodermique doit être exclu de la valeur de variation du débit ΔQ dans le cours d'eau qui sera prise pour effectuer le calcul du nouveau niveau d'eau.

2.3 Identification des polygones pollués

Dans le cadre de la simulation de propagation des polluants, le point de départ commence par l'identification des lieux situés sur les bords où l'eau débordée peut être affectée par un phénomène d'advection-diffusion des polluants. Cette identification, qui doit être faite avant le lancement de la modélisation, se base sur une inspection in situ pour définir le type de polluant et aussi pour donner les propriétés chimiques et physiques de la matière nocive susceptible à être portée ou dissoute par l'eau. La figure 2,9 suivante montre le mode de présentation des espaces pollués qui se trouvent sur le bord soumis au risque d'inondation.

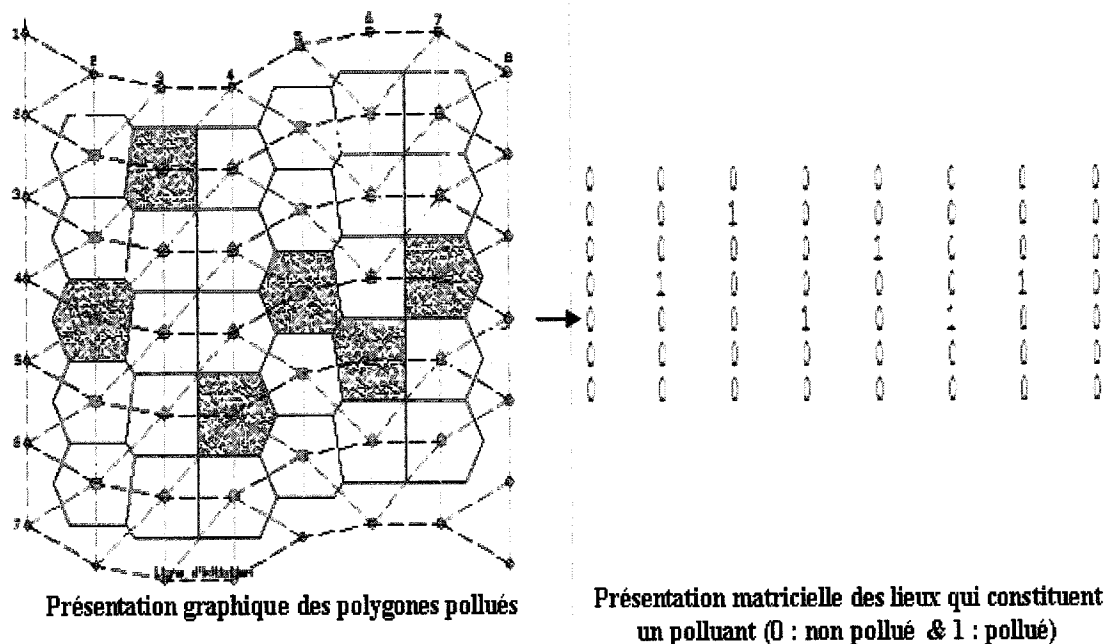


Figure 2,9: Mode de présentation graphique et matricielle des lieux pollués

On suppose pour commencer que l'espèce polluante est mélangée au niveau moléculaire. Par conséquent, le polluant est représenté par la concentration dans le volume de la cellule élémentaire. D'où, le polygone correspondant à cette cellule présente la forme de la section horizontale du volume. La concentration correspond à une masse de polluant par unité de

volume du mélange fluide-polluant. Alors, pour modéliser la propagation des polluants durant la crue, on constate que les données demandées sont les suivantes:

- l'aire du polygone ;
- la profondeur d'eau;
- les distances qui séparent le centre du polygone et les centres des polygones avoisinés;
- les pentes des lignes d'eau entre le centre du polygone et les centres des polygones périphériques;
- les propriétés physiques et chimiques du polluant;
- les concentrations des polluants dans la cellule analysée et les cellules voisines.

Il est important de dire que le facteur de la température, qui influence la quantité de diffusion des polluants entre les cellules, sera pris en considération dans l'estimation du coefficient de diffusion. À noter que la valeur de ce dernier dépend non seulement de la température mais aussi du type de polluant. On montrera, dans le chapitre 3, les expressions mathématiques développées pour ce calcul.

La présentation adoptée pour les valeurs de concentration dans chaque polygone est du type matriciel. On considère, par hypothèse, que la valeur de la concentration dans le polygone déjà pollué avant le débordement est égale à la valeur de la saturation. Cette supposition est basée sur le fait que la vitesse horizontale de l'écoulement est lente et proche de celle de la propagation verticale des polluants.

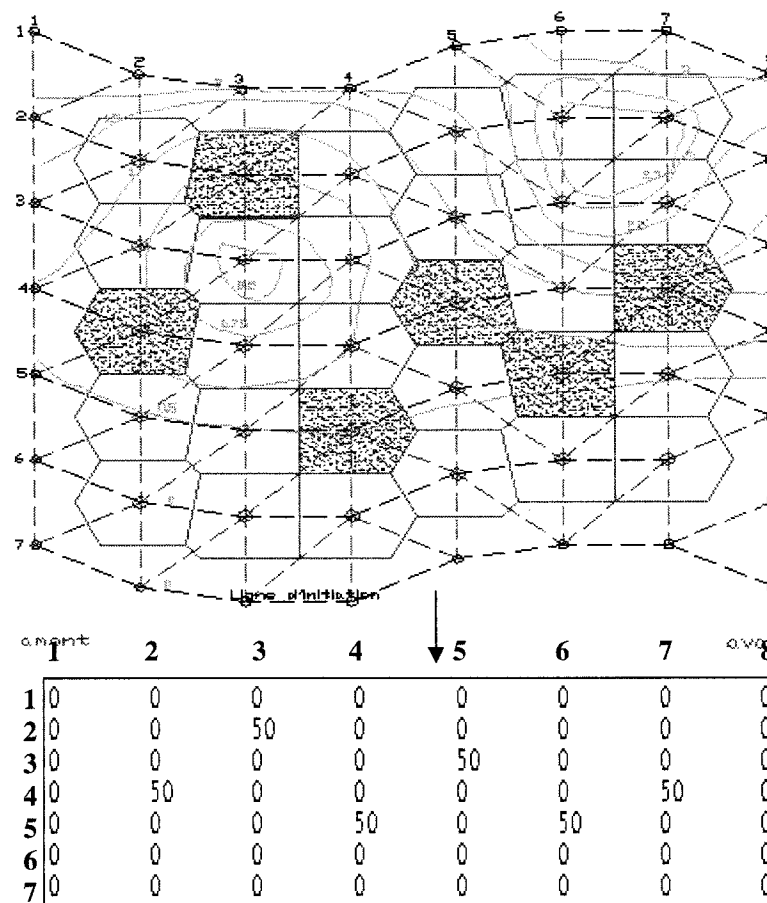


Figure 2,10: Présentation des valeurs de concentration avant le début de la crue

Dans la figure 2,10 ci dessus, la valeur 50 g/m^3 , prise comme exemple et présentée dans la matrice des données, désigne la masse des polluants à la saturation dans une unité de volume d'eau. Ce chiffre est fonction du type de polluant, de la température de fluide et du régime d'écoulement.

2.4 Calcul géométrique

La croissance du débit en amont du cours d'eau et la géométrie de la région des bords forment les facteurs déclencheurs de l'inondation sur les rives. En admettant que le calcul géométrique est une étape préparatoire pour passer aux calculs hydrauliques, on est demandé à l'effectuer en premier. En

se basant sur l'approche de la répartition des surfaces de bords en des surfaces polygonales finies.

On exécute le calcul des paramètres géométriques de chaque polygone après avoir identifié les 4 parallélogrammes qui permettront le traçage du pourtour de ce polygone.

La figure 2,11 montre un modèle détaillé du dessin menant au calcul des coordonnées des points périphériques d'un polygone.

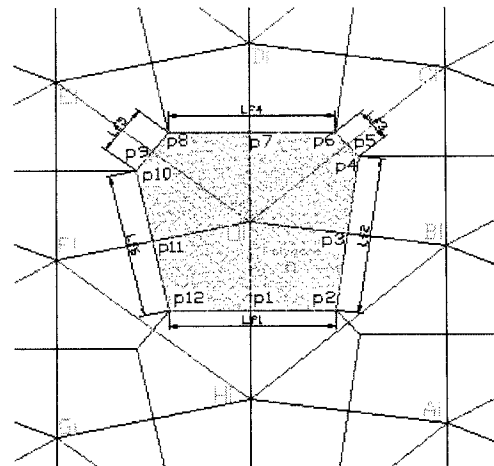


Figure 2,11: modèle type de la construction de polygone

Après avoir tracé les 4 diagonales les plus courtes dans les quatre parallélogrammes OBAH, DCBO, FOHG et EDOF, on calcule les coordonnées des points p1, p3, p5, p7, p9 et p11 qui sont respectivement les milieux des droites OH, OB, OC, OD, OE et OF. Ces points sont en même temps les points d'intersection des droites perpendiculaires avec les droites citées ci-dessus.

Pour déterminer les coordonnées des points p2, p4, p6, p8, p10 et p12, on cherche, dans le cas de notre modèle, les équations des 6 droites perpendiculaires aux droites OH, OB, OC, OD, OE et OF. Enfin, les points cherchés sont les points d'intersection entre les 6 droites perpendiculaires.

Les longueurs des frontières Lf1, Lf2, Lf3, Lf4, Lf5 et Lf6 ne sont que les distances entre les points p12→p2→p4→p6→p8→p10→p12. Ces longueurs désignent les largeurs des écoulements entre le centre du polygone analysé et les centres des polygones voisins.

Une fois les coordonnées de tous les points du pourtour de polygone sont connues, l'aire de ce polygone se calcule avec la formule topométrique suivante :

$$A = \sum_{i=1}^n ((X_{i+1} - X_i) * (Y_{i+1} + Y_i) / 2)$$

L'approche de parallélisme proposée par cette étude nous a permis aussi de déduire que l'aire du polygone est la somme des quarts des surfaces des 4 parallélogrammes.

2.5 Calcul hydraulique

Ce calcul se partage en deux étapes : la première détermine la variation de hauteur d'eau dans la cellule analysée et la deuxième calcule les débits latéraux sortants ou entrants afin de corriger le niveau d'eau calculé dans la première étape. Ce calcul se répète à chaque pas de temps Δt .

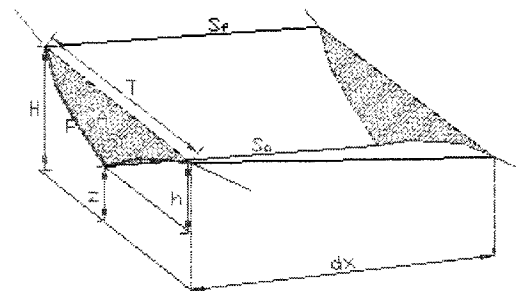
2.5.1 Analyse unidimensionnelle

Dans cette phase de calcul, les équations de Saint-Venant, formulées en 1871, s'appliquent telles qu'elles sont écrites ci-dessous :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = G$$

$$U = (A, Q), \quad F(U) = \left(Q, \frac{Q^2}{A} + gI_1 \right), \quad G = (0, gA(S_0 - S_f)),$$

$$S_f = \frac{Q^2 n_m^2}{A^2 R^{4/3}}, \quad I_1 = \int_0^h (h - \eta) b d\eta, \quad I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b}{\partial x} d\eta.$$



$$\delta A / \delta t + \delta Q / \delta x = \delta q / \delta x \quad (\text{équation de continuité})$$

$$\delta Q / \delta t + \delta(uQ) / \delta x + gA(\delta h / \delta x - S_0) + gAS_f = 0 \quad (\text{équation de quantité de mouvement})$$

A - Aire de la section transversale mouillée ;

Q - Débit ;

q - Débit latéral ;

g - Accélération gravitationnelle ;

S_0 - Pente du fond ;

S_f - Friction de la pente ou pente de la ligne d'eau ;

n_m - Coefficient de rugosité (Manning) ;

$R = A/P$, R - Rayon hydraulique, P - périmètre mouillé ;

I_1 - Terme de la force de pression hydrostatique;

I_2 - Les forces de pression dues aux variations des largeurs d'écoulement ;

h - Profondeur d'eau;

η - Variable d'intégration indiquant la distance du fond de canal;

$b(x, \eta)$ - Largeur de la rivière.

Il est primordial de vérifier en premier lieu l'applicabilité de cette méthode en évaluant l'effet du nombre de Froude sur les équations de continuité et de mouvement, et celle-ci, en suivant le raisonnement suivant :

Équation de continuité :

$$\frac{\delta \xi}{\delta t} + \frac{1}{b} \frac{\delta Q}{\delta x} = q \quad \implies \quad \frac{\delta \xi}{\delta t} + \frac{\delta q}{\delta x} = 0$$

u^* , h^* , t^* \longrightarrow sont respectivement la vitesse, hauteur et le temps de référence.

$$u^* = \frac{h^*}{t^*} \quad \bar{h} = \frac{h}{h^*} \quad \bar{u} = \frac{u}{u^*} \quad \bar{t} = \frac{t}{t^*}$$

$$q = u \times h \quad \bar{q} = \frac{q}{q^*} \quad \implies \quad q = \bar{q} \times q^* = \bar{q} \times u^* \times h^*$$

Le changement en terme adimensionnel nous aboutit au :

$$\frac{\delta \xi \times h^*}{\delta t \times t^*} \times \frac{h^*}{t^*} + \frac{\delta q / u^* \times h^*}{\delta x / h^*} \times \frac{u^* \times h^*}{h^*} = 0$$

$$\implies \quad \frac{\delta \bar{\xi}}{\delta \bar{t}} + \frac{\delta \bar{q}}{\delta \bar{x}} = 0$$

Équation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \times A \times \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \times A \times S_f = 0$$

$$\text{Or: } Q^* = u^* \times h^{*2}; \quad \bar{Q} = \frac{Q}{Q^*} \implies Q = \bar{Q} \times Q^*; \quad t = \bar{t} \times t^* ;$$

$$t^* = \frac{h^*}{u^*}$$

$$\implies \frac{\partial \bar{Q} \times Q^*}{\partial \bar{t} \times t^*} + \frac{\partial}{\partial x \times h^*} \left(\frac{\bar{Q}^2 \times Q^{*2}}{A \times A^*} \right) + g \times \bar{A} \times A^* \times \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + g \times \bar{A} \times A^* \times S_f = 0$$

$$\implies \frac{Q^*}{t^*} \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{t}} + \frac{Q^{*2}}{A^* \times h^*} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{Q}^2}{A} \right) + A^* \times g \times \bar{A} \times \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + A^* \times g \times \bar{A} \times S_f = 0$$

$$\implies \frac{Q^* \times u^*}{A^* \times t^*} \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{t}} + \frac{Q^{*2} \times u^{*2}}{A^{*2} \times h^*} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{Q}^2}{A} \right) + g \times \bar{A} \times \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + g \times \bar{A} \times S_f = 0$$

$$\implies \frac{u^{*2}}{g \times h^*} \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{t}} + \frac{u^{*2}}{g \times h^{*2}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{Q}^2}{A} \right) + \bar{A} \left[\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + S_f \right] = 0$$

$$\implies N_f^2 \left[\frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{Q}^2}{A} \right) \right] + \bar{A} \left[\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x} + S_f \right] = 0$$

On note qu'un faible nombre de Froude (N_f) permet alors de négliger le premier terme de l'expression précédente dans l'analyse de débordement surtout dans le cas d'une profondeur d'eau relativement importante.

L'analyse du cours d'eau à l'intérieur de ses limites initiales, où les effets dynamiques sont pris en considération, nous permet de calculer la vitesse de l'écoulement et la variation de profondeur de l'eau à chaque section transversale. Ensuite, on peut déduire le pas du temps nécessaire pour que

l'eau traverse la cellule. Ce temps est limité par la condition du courant et se calcule par l'expression suivante :

$$\Delta t = 0.9 \cdot \Delta x / V_f \text{ avec } V_f = V_{\text{écoulement}} + 2 \cdot (g \cdot (A / T))^{1/2}$$

Δx : distance qui sépare les sections verticales; ($\Delta x = 300\text{m}$)

V_f : la somme de la vitesse d'écoulement longitudinal et la célérité;

A : aire de la section verticale;

T : largeur superficielle de la section.

À noter qu'à chaque pas de temps, on parcourt le long de la ligne d'écoulement pour calculer la nouvelle hauteur d'eau à la suite de la croissance ou de la décroissance du débit en amont de l'affluent.

2.5.2 Analyse de débordement ou découverture des bords

Dans cette phase de calcul, on néglige les effets dynamiques si le seuil qu'on a fixé pour le nombre de Froude n'est pas dépassé. Puis, on calcule, à chaque pas de temps Δt , les vitesses et les débits transportés par les six lignes d'écoulement, générées par cette étude, dans chaque polygone. Puis, on déduit tous les volumes d'eau entrants et sortants qui résultent essentiellement de la pente d'eau entre les points formant les extrêmes des lignes d'écoulement. Ensuite, on fait, suivant la loi de la conservation de masse, la somme algébrique de tous les volumes qui le correspondent afin de savoir le signe et la valeur de la variation de volume initial d'eau après un certain temps, Δt . Cette variation de volume sera divisée par la surface horizontale du polygone pour déduire, à la fin de chaque Δt , le changement du niveau d'eau au centre du polygone analysé. Les paramètres hydrauliques qu'on peut calculer dans cette étape sont les suivants :

- Les débits entrants et sortants qui seront soustraits ou ajoutés à la variation du débit en amont avant de commencer le calcul qui correspond au pas du temps suivant;
- Le nouveau niveau d'eau au centre de chaque polygone;

- La limite bidimensionnelle de l'expansion d'eau sur les bords de l'écoulement;
- Les volumes nécessaires au calcul de la propagation des polluants sur les bords inondés.

Le calcul de la vitesse d'écoulement doit être précédé par une vérification de quelques conditions géométriques et hydrauliques formant les facteurs déclencheurs du mouvement d'eau entre deux points. Ensuite, la valeur numérique de la vitesse se déduit après avoir calculé les termes dont la vitesse est fonction d'eux.

En principe, le problème de la vitesse peut être résolu par trois méthodes, soit la méthode des **caractéristiques**, la méthode **explicite** et la méthode **implicite** (voir "*Practical Aspects of Computational River Hydraulics*", [1979], J A Cunge, FM Holly Jr, A Verwey, pp. 54 - 72). Mais, vue les conditions hydrauliques et géométriques qui caractérisent le cas de cette recherche, la méthode proposée prend une forme quasiment implicite et se base, tout simplement, sur l'application de la formule de Manning qui calcule la vitesse dans un écoulement à surface libre avec une pente faible. On considère, par hypothèse, que les niveaux d'eau des polygones restent constants durant le pas de temps, et par conséquent, les vitesses et les débits d'eau qui traversent les frontières d'écoulement restent aussi constants durant ce même Δt .

Quant à la vérification des conditions qui précèdent le calcul de la vitesse, il existe deux conditions principales :

- La **profondeur d'eau** au point de départ doit être **non nulle**;
- Le **niveau d'eau au point de départ** doit être **plus haut** que le **niveau d'eau** et le niveau du fond **au point d'arrivée**.

Une fois les deux conditions sont justifiées, on passe à l'étape de calcul. Dans la méthode proposée, les trois termes demandés pour déduire la valeur

de la vitesse et la direction de l'écoulement sont : la profondeur d'eau (h), la pente de la ligne d'eau (S_f) et le coefficient de rugosité (n).

$$V = h^{2/3} * S_f^{1/2} / n$$

Les paramètres demandés se calculent pour chaque ligne d'écoulement liant le centre du polygone en analyse avec les centres des polygones périphériques. La pente d'eau n'est que la différence de niveau entre deux points divisée par la distance horizontale qui les sépare.

La profondeur d'eau est la profondeur moyenne d'eau entre le point de départ et le point d'arrivée. De même, le coefficient de rugosité ou de Manning est aussi le coefficient moyen entre le point de départ et le point de destination.

La figure 2,12 suivante nous montre un exemple des directions des six vitesses d'eau dans le polygone en fonction des niveaux des points qui limitent les lignes d'écoulement.

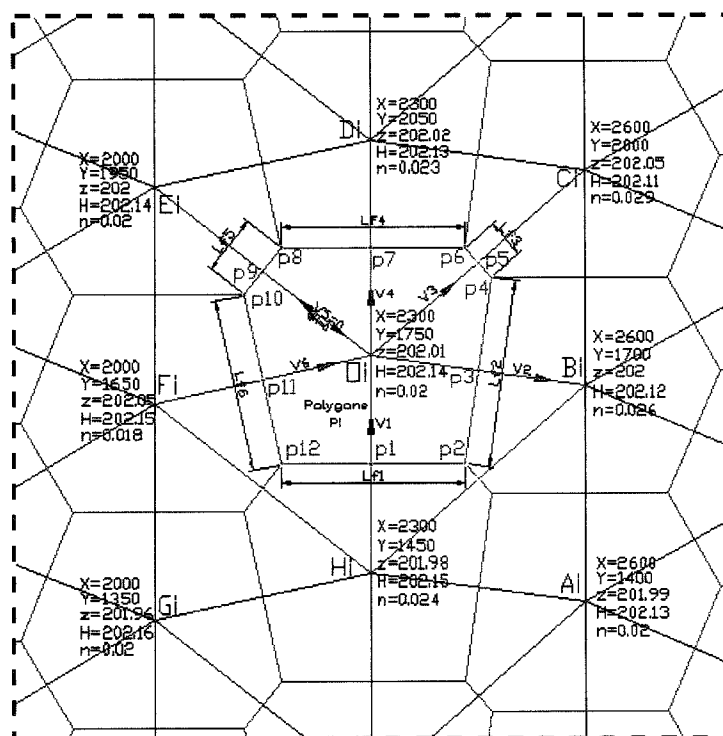


Figure 2,12: Modèle type pour le calcul des vitesses d'eau dans un polygone

Avec le calcul des vitesses d'eau traversant les six frontières du polygone, on peut déduire les débits entrants et sortants. Les débits entrants ont un signe positif et les débits sortants ont un signe négatif. Ces débits se résultent par la multiplication de vitesse d'eau par la surface verticale de la frontière traversée.

$$q_i = V_i * L_{f_i} * h_{i(moy)}$$

Par hypothèse, un débit d'une ligne d'écoulement est considéré nul, même s'il est positif, lorsque la première goutte partant du point de départ n'est pas encore arrivée au point de destination.

L'intervention du pas de temps Δt vient ici nous permettre de déterminer le nouveau niveau du centre de polygone à la fin de Δt . Ce niveau se déduit lorsque la différence de la hauteur ΔH , produite après Δt , est calculée selon la loi de la conservation de masse;

$$\Delta H = (\text{volume entrant} - \text{volume sortant}) / \text{Aire}_{\text{polygone}}$$

$$\implies \Delta H = \sum (q_i * \Delta t) / \text{Aire}_{\text{polygone}}$$

À noter que ΔH est toujours positive au cours de la crue, pourtant ce terme est négatif durant la décrue. Parfois, il se peut que ΔH soit nulle, au cours de la décrue, lorsque la topographie périphérique de ce polygone présente une sorte de réservoir naturel.

La nouvelle hauteur d'eau au centre du polygone sera alors :

$$H_{t+\Delta t} = H_{t-\Delta t} + \Delta H_{\Delta t}$$

À chaque Δt , on balaie tous les polygones pour calculer les nouveaux niveaux d'eau avant de passer au pas de temps suivant durant lequel le calcul se basera sur les nouvelles valeurs des hauteurs calculées durant le pas de temps précédent.

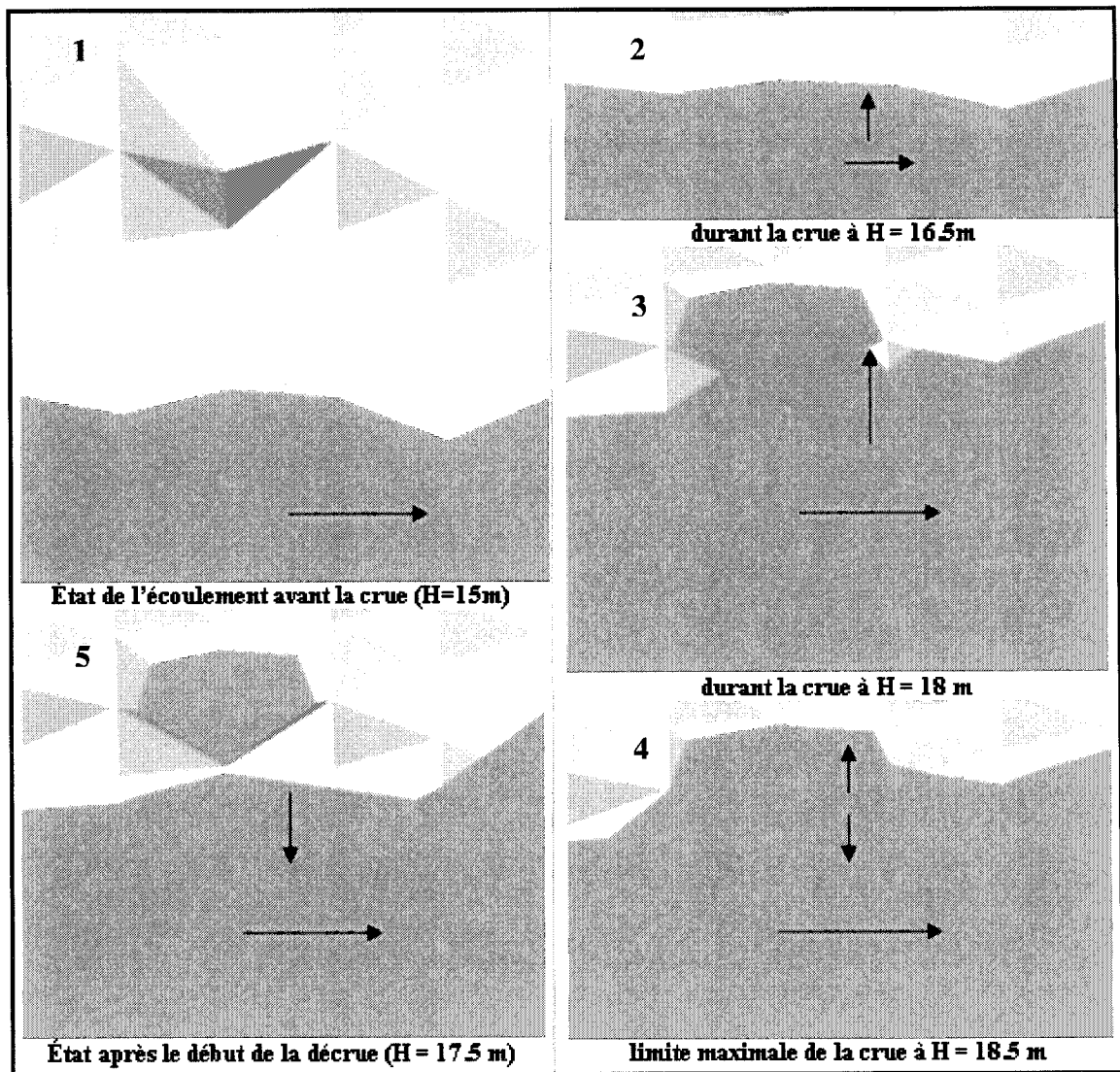


Figure 2,13: Limite de l'inondation durant la crue et la décrue

Le développement de la limite d'eau avec le bord de l'écoulement change à chaque Δt . Ce changement horizontal est fonction d'une part, de la variation du niveau d'eau qui est due au changement du débit d'écoulement en amont, et d'autre part, de la vitesse de débordement qui est fonction de la pente de rive.

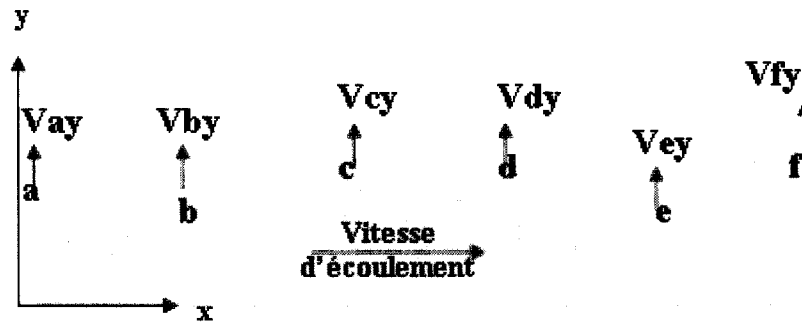


Figure 2,14: Changement de la limite d'eau-bord

La figure 2,14 ci-dessus montre le mode de débordement qui se définit selon un repère local (x, y). L'expansion de la limite (a-b-c-d-e-f) sur le bord de l'écoulement se réalise en fonction de la vitesse de débordement V_y et de la longueur du pas de temps Δt .

En se basant alors sur le repère cartésien horizontal, le calcul de l'ordonnée de chaque point de la ligne eau-bord suit l'expression ci-dessous. Par exemple au point (a) :

$$ay_{(t)} = ay_{(t-\Delta t)} + Vay_{(\Delta t)} * \Delta t \quad \text{où}$$

$ay_{(t)}$: la nouvelle ordonnée du point (a) après un temps de Δt ;

$ay_{(t-\Delta t)}$: l'ordonnée du point (a) avant le début du pas Δt ;

$Vay_{(\Delta t)}$: Vitesse de débordement au point (a) durant Δt . Dans le cas de décrue, cette vitesse est négative et par conséquent le point (a) recule vers l'axe de l'écoulement longitudinal.

Δt : le pas de temps.

Ainsi, on présente dans la figure suivante l'algorithme de la méthode proposée afin d'effectuer la modélisation :

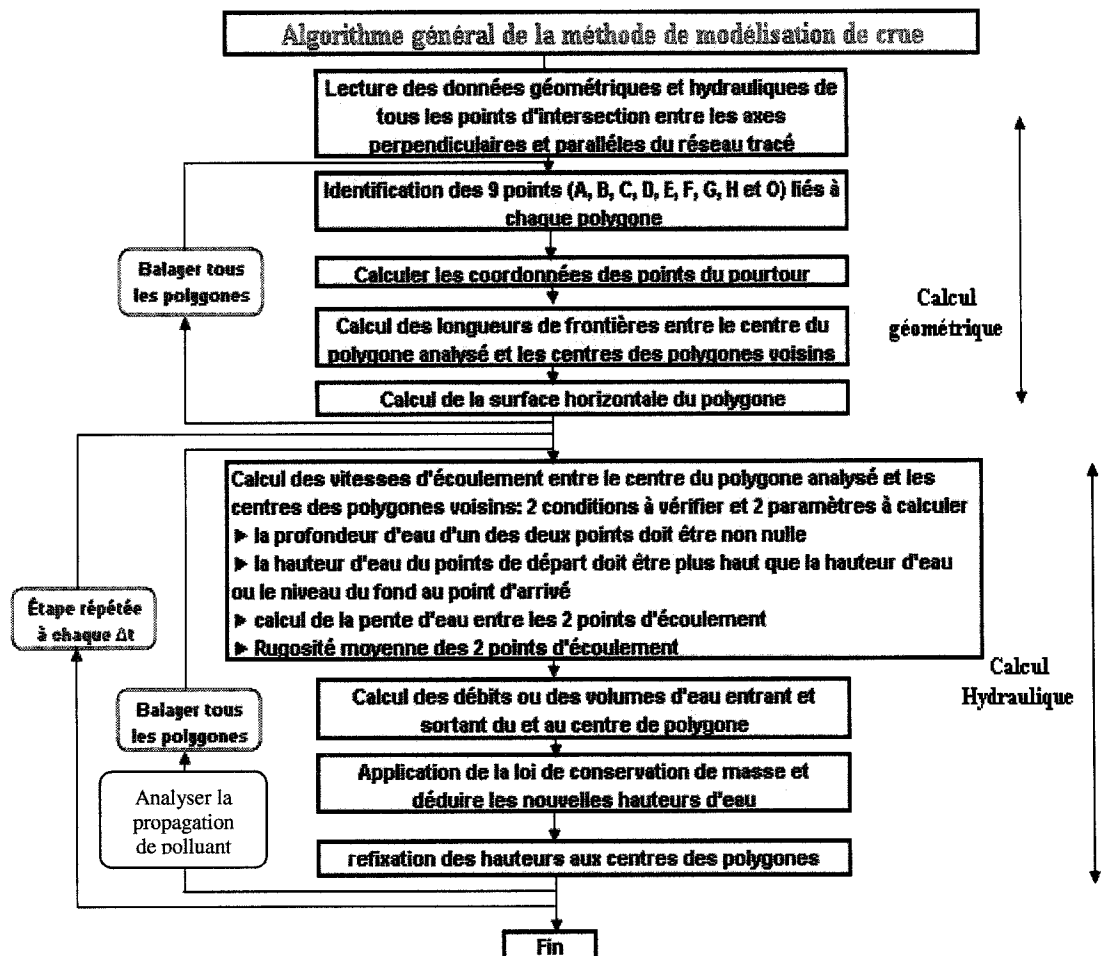


Figure 1,15: Plan de la méthode de calcul

CHAPITRE 3

PROPAGATION DES POLLUANTS DURANT LA CRUE

3.1 Objectif de l'analyse

La présence de plus en plus fréquente de pollutions ponctuelles sur les bords des rivières et fleuves incite à développer des outils de simulation numérique permettant de déterminer précisément les champs de concentration en fonction de l'espace et du temps. Les pollutions ponctuelles qui affectent les eaux d'inondation ont des origines diverses. Elles peuvent provenir des rejets effectués par les industriels et les élevateurs ou être provoquées par les engrais ou les actes inconscients, malveillants ou accidentels qui laissent des zones polluées sur les bords soumis aux risques d'inondation.

Les conséquences de ces contaminations sur l'écosystème sont parfois très graves. Par conséquent, on veut des outils qui soient capables de prévoir très précisément la progression de la pollution au cours du temps afin d'anticiper les mesures à appliquer et limiter la dégradation du milieu environnant.

3.2 Approche et hypothèses de la modélisation

Le niveau de la modélisation dépend généralement de la région étudiée. Dans le voisinage du point éjectant des polluants, le mélange se réalise dans toutes les directions de l'espace. Dans cette recherche, on considérera seulement la transmission horizontale en 2D, car la transmission verticale est supposée homogène, et par conséquent, la concentration est homogène à tous les niveaux de la zone affectée. C'est pourquoi, nous disposons d'un seul niveau de modélisation numérique bidimensionnelle qui se consacre au

champ moyen en supposant que les concentrations sont homogènes sur une verticale. D'autre part, on considère, par hypothèse, que la concentration de polluant dans la cellule émettant la pollution soit toujours égale à la valeur de saturation. Ceci car la masse des polluants sortant horizontalement d'une cellule-source de pollution sera récupérée par l'émission verticale des polluants à l'intérieur de cette même cellule.

En ce qui concerne les substances polluantes, on se limite à celles se trouvant sous formes dissoutes et étant introduites avec des fractions massiques très faible à celle de l'eau. Toutefois, on tient compte du comportement physico-chimique de ces substances à travers une bonne estimation du coefficient de diffusion.

La méthode de calcul suggérée dans le cadre de cette étude se base principalement sur la subdivision polygonale (ou méthode des volumes de contrôle) déjà détaillée par la méthode de calcul hydraulique traitée dans le chapitre 2. Les débits, entrants ou sortants de chaque polygone de la subdivision, qui résultent à la fin de chaque pas du temps Δt vont servir à la détermination de la propagation des masses de polluants transmises par diffusion d'une cellule à autre ou par transport ou par advection qui a normalement la même vitesse que l'écoulement. Dans cette optique, cette recherche vise à modéliser la progression de la pollution dans l'eau inondée en terme de concentration par l'intermédiaire d'un modèle de diffusion-advection.

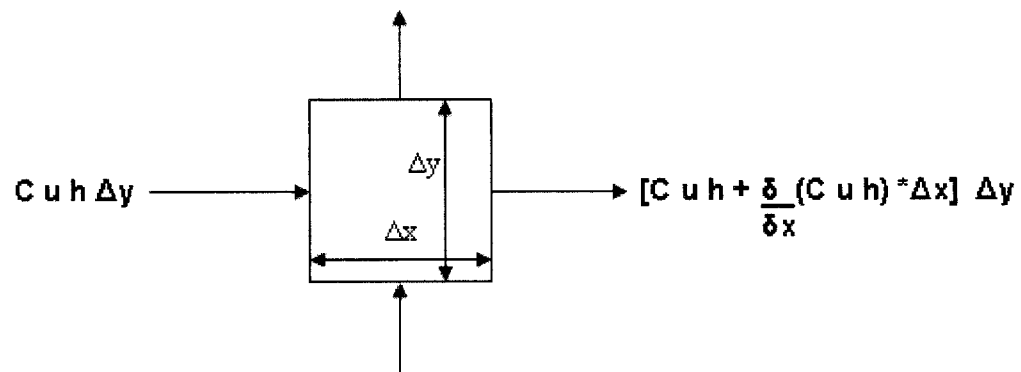
Par ailleurs, l'aspect thermique ne doit pas être négligé. Il peut avoir une influence déterminante sur l'écoulement et sur le comportement chimique des substances polluantes. Mais pour simplifier le calcul, ce facteur sera pris en considération au moment de l'estimation du coefficient de diffusion. C'est pourquoi, l'effet de la température intervient alors d'une façon indirecte dans le processus adopté par le calcul. Lorsque le coefficient de diffusion doit être

donné au début de la modélisation, il est donc demandé de l'évaluer en fonction du type de polluant, de la température et du régime d'écoulement.

3.3 Méthode de calcul

Comme il est indiqué dans la partie précédente de ce chapitre, l'approche de calcul de la propagation des polluants dans l'eau inondée propose un modèle de calcul en terme de concentration par l'intermédiaire d'un modèle de diffusion-advection. À noter que le principe de base dans le calcul est d'appliquer la loi de la conservation de masse. Pour ce faire, et pour faciliter les tâches, on commencera par le développement général de l'équation du transport puis on ajoutera les termes de diffusion pour donner la forme généralisée finale menant au calcul des masses polluant les volumes d'eau débordés.

En premier, on part du point élémentaire d'écoulement et on définit la forme de transport des polluants par le schéma suivant :



Où : **C** est la concentration des polluants dans le volume du mélange (g/m^3);

u est la vitesse de transport (ou la vitesse d'écoulement) en (m/s);

h est la profondeur de la frontière d'écoulement en (m);

Δx est la longueur unitaire selon l'axe des x;

Δy est la longueur unitaire selon l'axe des y;

Si on fait une balance de masse en impliquant le facteur de temps (Δt) dans le volume de contrôle entrant et sortant on obtiendra :

Entrant: $C.u.h.\Delta y.\Delta t + C.v.h.\Delta x.\Delta t + St.\Delta t.\Delta x.\Delta y$

Sortant:

$$[C.u.h + \frac{\delta(C.u.h)}{\delta x}.\Delta x].\Delta y.\Delta t + [C.v.h + \frac{\delta(C.v.h)}{\delta y}.\Delta y].\Delta x.\Delta t + C.I.\Delta t.\Delta x.\Delta y$$

Où : St est le taux de solubilité ($g/s/m^2$);

I est le taux d'infiltration (m/s);

La différence en masse entre les polluants entrant et sortant nous permet de déduire la réduction ou l'augmentation de la concentration dans le volume analysé. Cette différence s'exprime par l'égalité suivante :

$$\frac{\delta(C.h)}{\delta t} + \frac{\delta(C.u.h)}{\delta x} + \frac{\delta(C.v.h)}{\delta y} = St - C.I \quad (3.1)$$

L'équation ci-dessus peut être développée en :

$$h \frac{\delta C}{\delta t} + u h \frac{\delta C}{\delta x} + v h \frac{\delta C}{\delta y} + C \left(\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta u h}{\delta x} + \frac{\delta v h}{\delta y} \right) = St - C.I \quad (3.2)$$

$\left(\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta u h}{\delta x} + \frac{\delta v h}{\delta y} \right) \longrightarrow$ est le terme qui désigne l'équation de la conservation du volume de solvant. Et par hypothèse, on considère que le volume de la solution est égale au volume du solvant c'est-à-dire le volume des polluants est négligeable par rapport au volume du solvant;

$$\text{Or } \frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta u h}{\delta x} + \frac{\delta v h}{\delta y} = R - I \quad (3.3)$$

Où : R est l'intensité pluviale (m/s);

En substituant (3) dans (2) on aura :

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} = \frac{St}{h} - \frac{C.R}{h} \quad (3.4)$$

Dans les codes de cette modélisation numérique, l'intensité pluviale est négligée et considérée nulle.

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} = \frac{St}{h} \quad (3.4')$$

Si on ajoute à l'expression (4') l'effet de la diffusion en utilisant la loi de Fick, on aura :

$$\frac{\delta C}{\delta t} + u \frac{\delta C}{\delta x} + v \frac{\delta C}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta x} \left(D \frac{\delta C}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(D \frac{\delta C}{\delta y} \right) + \frac{St}{h}$$

Où : **D** est le coefficient de diffusion (m²/s);

La dérivation de la loi de **Fick** en 2D se présente dans le schéma suivant :

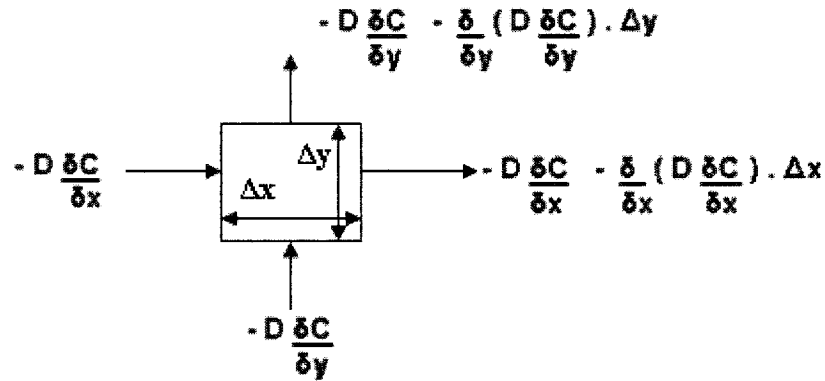


Figure 3,1: Dérivation de la loi de Fick en 2D

La différence entre les flux entrant et sortant durant un pas de temps nous donne:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(D \frac{\delta C}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(D \frac{\delta C}{\delta y} \right) \quad (3.5)$$

L'expression ci-dessus sera appliquée sur chacune des six lignes d'écoulement dans chaque polygone de la subdivision géométrique proposée; on commence par la quantité de diffusion V_D (g/m².s):

$$V_D = \frac{(C1 - C2) \cdot D}{\Delta S} \quad (3.6)$$

Où : **C1** est la concentration des polluants au point de départ (g/m³);

C2 est la concentration des polluants au point d'arrivée (g/m³);

D est le coefficient de diffusion (m²/s);

ΔS est la longueur entre les deux points qui limitent l'écoulement (m);

Quant au coefficient de diffusion, ce terme s'exprime en fonction du type de polluant, de la profondeur et de la vitesse d'écoulement. Le calcul de ce coefficient suit l'expression suivante :

$$D = D_0 + D^* \quad \text{avec} \quad D^* = C \cdot h \cdot u^*$$

Où : **D₀**: Le coefficient de la diffusion moléculaire (m²/s)

D* : Le coefficient de la diffusion due à la turbulence (m²/s)

C : Une constante liée à la profondeur d'eau et à la vitesse de cisaillement;

h : Profondeur de l'écoulement;

u* : Vitesse de cisaillement;

$$u^* = \left(\frac{\zeta_0}{\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{\gamma \cdot h \cdot S_f}{\rho} \right)^{1/2} = (g \cdot h \cdot S_f)^{1/2} \quad (3.7)$$

S_f : Pente de la ligne d'eau.

En tenant compte de la diffusion et de l'advection, qui sont les deux facteurs générant la transmission des polluants entre les cellules de la subdivision, les masses des polluants seront alors fonction de la vitesse de transport, la quantité de diffusion, la section verticale de la ligne d'écoulement et aussi du pas de temps.

Afin de calculer la concentration finale à l'intérieur du polygone, il est nécessaire de calculer le volume final d'eau dans ce polygone à la fin de pas du temps analysé. Ce volume sera :

$$\text{Volume}_{\text{final}} = \text{Volume}_{\text{initial}} + \Sigma \text{Volume}_{\text{entrant}} - \Sigma \text{Volume}_{\text{sortant}}$$

Sur chacune des six lignes d'écoulement générées dans le même polygone, on calcule le volume entrant ou sortant par l'expression suivante :

$$\text{Volume}_{(\text{entrant ou sortant})} = \text{vitesse}_{\text{transport}} * L_f * h_{\text{moyenne}} * \Delta t$$

Où : L_f est la largeur de la frontière d'écoulement (m);

h_{moyenne} est la hauteur moyenne de l'écoulement (m);

Δt est le pas de temps (s);

On note que le volume est considéré entrant si la pente d'eau est positive (c'est-à-dire la hauteur d'eau au centre du polygone est plus basse que celle de l'autre point de la ligne d'écoulement). Et sinon, le volume est considéré sortant. Cette distinction se déduit aussi par le calcul de la vitesse qui est fonction de la pente d'eau, et par conséquent la valeur de volume aura le même signe que celui de la vitesse qui permet de le déterminer. Une fois les volumes entrants et sortants sont calculés, on peut déterminer les masses des polluants transmises par le transport des volumes d'eau.

$$\text{Masse transmise}_{(\text{transport})} = \sum \text{Volume}_{(\text{entrant ou sortant})} * \text{Concentration}$$

Les masses transmises par diffusion sont calculées par l'expression suivante :

$$\text{Masse transmise}_{(\text{diffusion})} = \sum V_{(\text{diffusion})} * \text{Section Verticale}$$

À noter que le signe de la quantité de diffusion est positif si la concentration au centre du polygone est plus petite que celle de l'autre point de la ligne d'écoulement et il est négatif si c'est le contraire.

Il est primordial de savoir la masse initiale des polluants à l'intérieur du polygone au début du pas de temps afin de compléter le calcul de la concentration :

$$\text{Masse}_{(\text{initiale})} = \text{Volume}_{(\text{initial})} * \text{Concentration}_{(\text{initial})}$$

Une fois le calcul des paramètres précédents est fait, on peut déterminer la concentration finale des polluants à la fin du pas de temps analysé :

$$C_{\text{final}} = (\text{Masse transmise}_{(\text{transport})} + \text{Masse transmise}_{(\text{diffusion})} + \text{Masse}_{(\text{initiale})}) / \text{Volume}_{\text{final}}$$

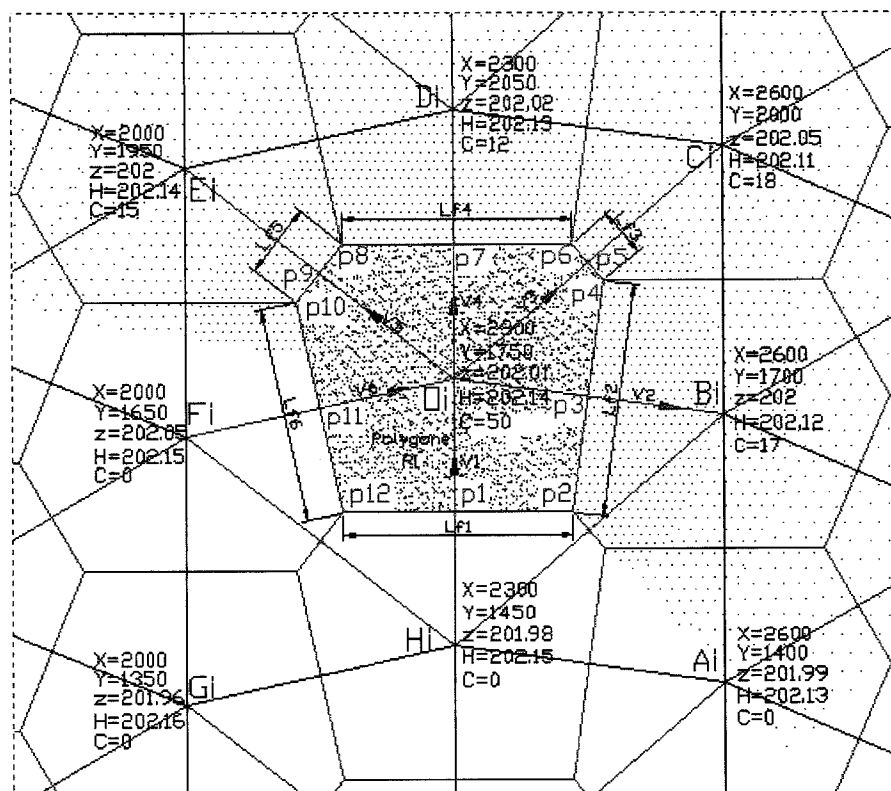


Figure 3,2: Mode de la transmission des polluants

CHAPITRE 4

APPLICATION SUR UN MODÈLE TYPE

L'efficacité de la méthode proposée par cette étude sera vérifiée par une application sur un modèle type dont le but est de faire une démonstration numérique du mode de calcul. Le modèle fourni présente non seulement une géométrie plane pour les surfaces de bords mais aussi des cuvettes naturelles qui causeront après la décrue une formation des flaques d'eau. C'est pourquoi et afin de caractériser les conditions topographiques requises, un modèle type est inventé. À noter ici que l'application de la méthode de calcul suivra les étapes telles qu'elles sont classées dans l'algorithme figuré du chapitre 2 de cette thèse.

Il est primordial de dire qu'une étape préparatoire doit précéder le début de la modélisation; il s'agit de balayer la carte topographique le long de la ligne d'écoulement et ensuite distinguer les régions plates qui peuvent être soumises au risque d'inondation causée par la crue. Cette étape sera suivie par un découpage de chaque segment dont il fait sujet à un incident de submersion.

4.1 Collecte des données

4.1.1 Levé de la topographie et du niveau d'eau

Une fois la région à étudier est identifiée, on la découpe et on montre la topographie des rives gauche et droite qui se définit par les courbes de niveau et aussi par l'identification du niveau initial de l'eau avant le début de la crue. On attire l'attention que la longueur de la région d'analyse est de 2.1 Km et la largeur de chaque bord est de 1.5 Km. Cette partie se présente par la figure suivante :

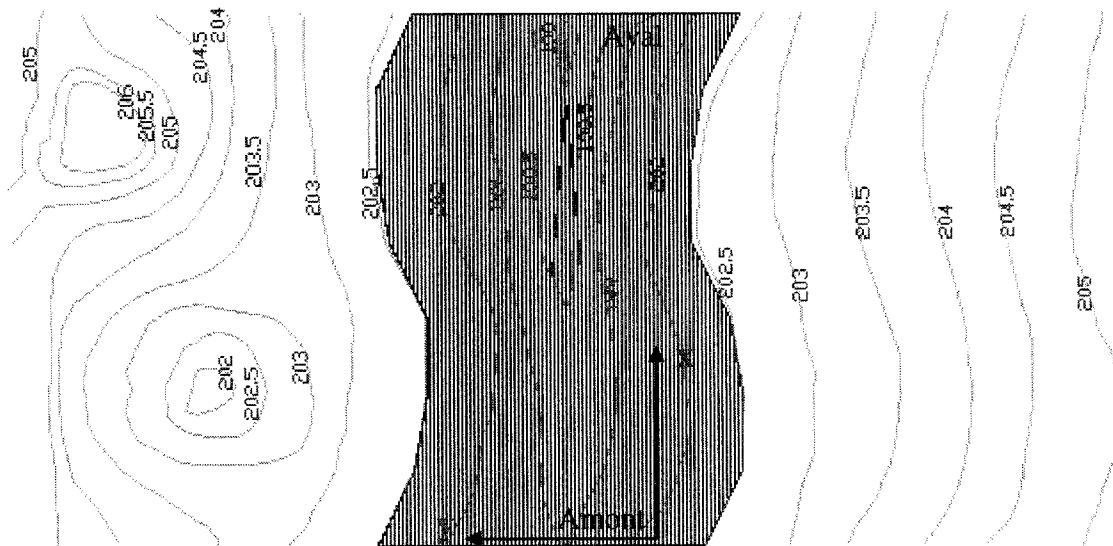


Figure 4,1: La topographie des bords et les limites initiales du cours d'eau

4.1.2 Traçage des coupes transversales sur la ligne d'écoulement

L'analyse unidimensionnelle de l'écoulement exige de faire des coupes transversales sur la ligne de l'écoulement longitudinal. Ces coupes nous permettent de déterminer la variation du niveau d'eau en fonction de la variation du débit en amont. L'espacement entre les coupes se fixe en fonction du changement de la largeur superficielle de l'écoulement. En d'autre terme, il faut que le changement de la largeur superficielle entre deux coupes soit quasiment linéaire afin de pouvoir utiliser les valeurs moyennes des paramètres hydrauliques calculées aux niveaux des deux coupes. La section comprise entre deux coupes est nommée une cellule. La face superficielle de la cellule est toujours considérée horizontale dans l'analyse unidimensionnelle. Dans notre application, on a fixé une longueur de 300m pour chaque cellule. À noter que, les longueurs des cellules pourraient être inégales, mais la région étudiée nous a permis de prendre une longueur homogène.

Par hypothèse, les coupes ont la même direction que celle des axes perpendiculaires au profil longitudinal de l'écoulement. On présentera dans la figure 4,2 ci-dessous le découpage du cours d'eau de notre modèle type.

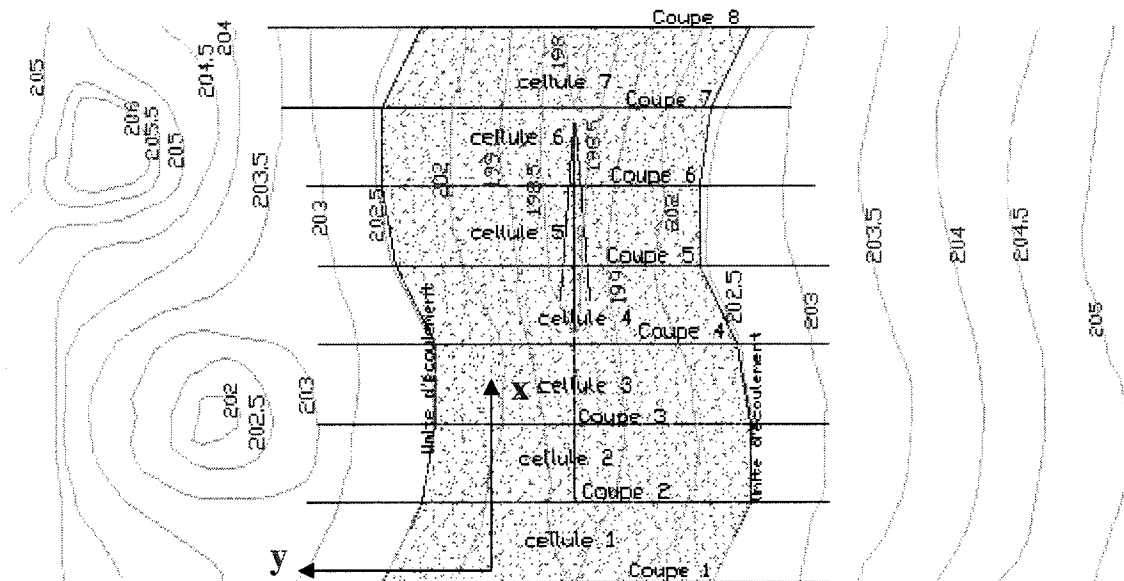


Figure 4,2: Découpage de la ligne d'écoulement longitudinal

À chaque coupe, on calcule l'aire de la section mouillée, le périmètre mouillé et la largeur superficielle. Par conséquent, on déduit la vitesse moyenne après avoir évalué la rugosité et la pente de l'écoulement.

4.1.3 Traçage des axes

Le dessin des axes parallèles et perpendiculaires au profil de l'écoulement longitudinal peut se faire indépendamment pour chacun des deux bords. À noter que la distance entre les coupes peut être divisible par l'espacement entre les axes, et par conséquent, le débit flottant ou sortant latéralement de la cellule située entre les deux coupes se répartit sur le nombre des sous-cellules qui résulte de la division de la longueur de cellule sur l'espacement entre les axes perpendiculaires. La figure suivante montre le traçage des axes dans notre modèle.

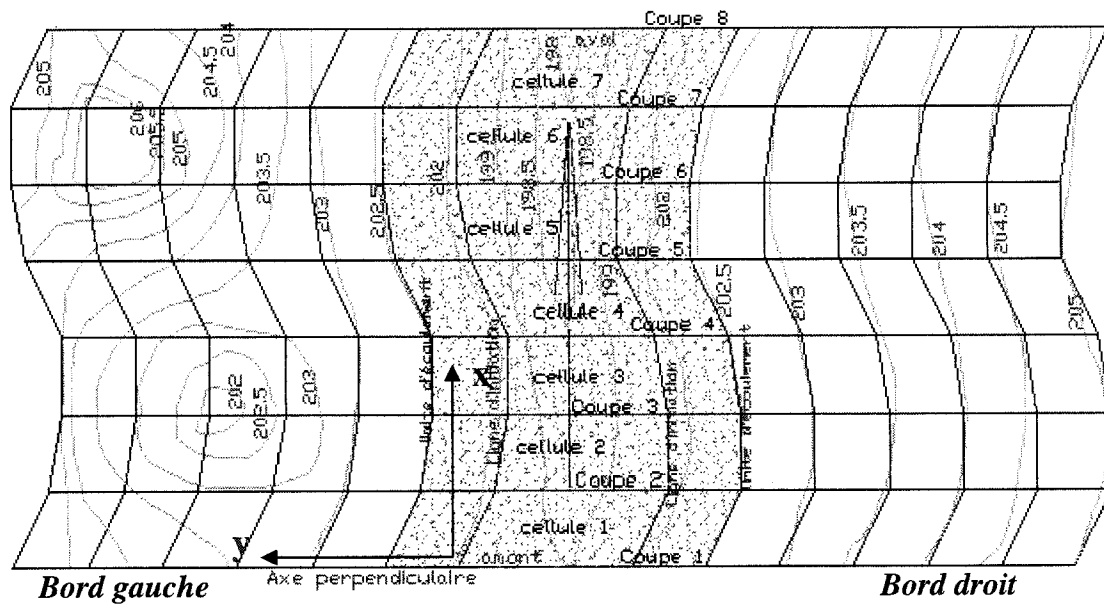


Figure 4,3: Traçage des axes parallèles et perpendiculaires

Dans cet exemple, la longueur de l'espacement entre les axes est égale à celle de la distance qui sépare les coupes transversales. On indique ici que la présentation des deux lignes d'initiation servira dans l'étape suivante à tracer les polygones dont les centres sont les points d'intersection entre les limites initiales d'eau avant la crue et les axes perpendiculaires.

4.1.4 Traçage des diagonales

Le dessin des diagonales dans les parallélogrammes, résultant du traçage des axes parallèles et perpendiculaires au profil longitudinal de l'écoulement, se fait selon la condition qui impose de tracer la diagonale la plus petite en longueur entre les deux diagonales d'un même parallélogramme. Dans notre modèle d'application, le dessin des diagonales se présente dans la figure suivante :

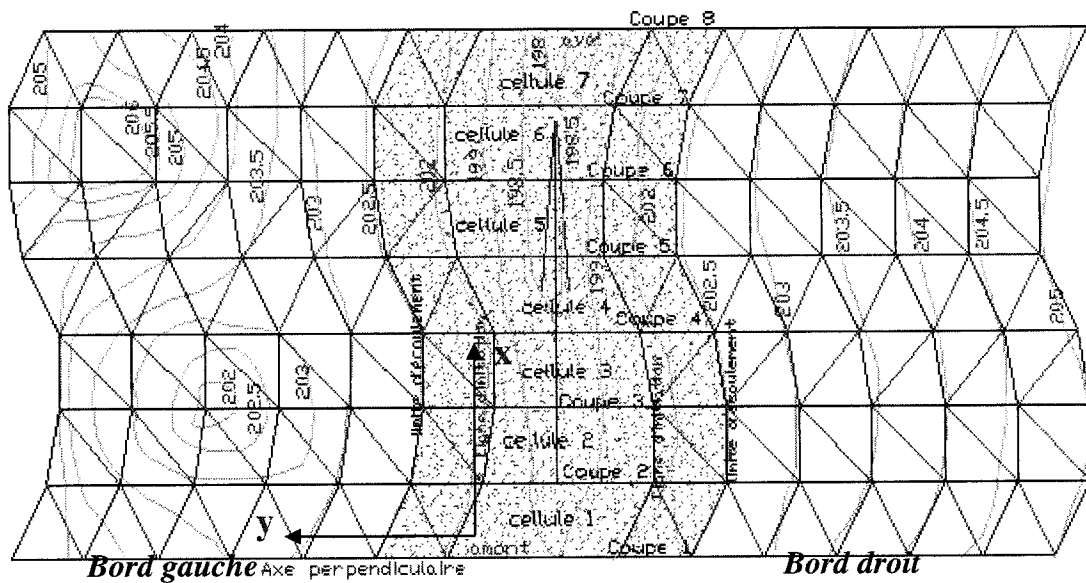


Figure 4.4: Traçage des diagonales

Il est utile de rappeler que le but derrière le traçage des diagonales, selon cette façon, est d'éviter avoir le point d'intersection des trois médiatrices de chaque triangle soit produit à l'extérieur de l'aire du triangle.

4.1.5 Traçage des limites de polygones

Le traçage des limites de polygones commence par le dessin des trois médiatrices de chaque triangle résultant par le traçage des diagonales. Chaque centre de polygone est en même temps un point d'intersection entre un axe parallèle et un autre perpendiculaire au profil longitudinal de l'écoulement. Les six points du pourtour de chaque polygone sont les points d'intersection des médiatrices situées dans les six triangles qui se situent autour du centre de polygone. La subdivision polygonale du modèle aura alors la forme illustrée dans la figure suivante.

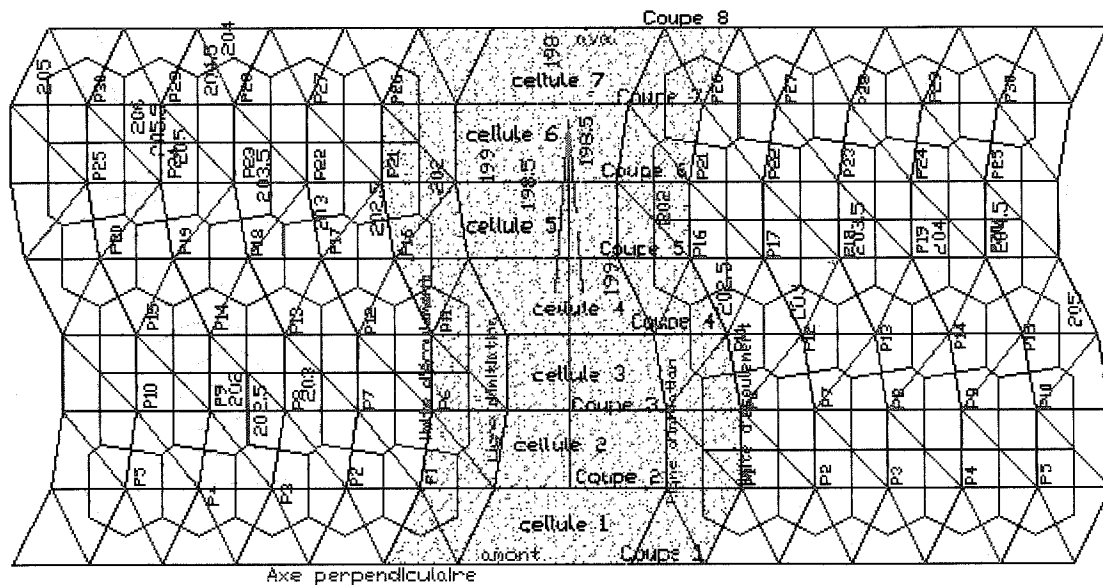


Figure 4.5: Subdivision polygonale des bords

Dans notre méthode, on note qu'à chaque Δt , l'analyse de débordement s'effectue indépendamment sur chacun des deux bords du cours d'eau. Ensuite, le débit total sortant ou entrant à la cellule sera la somme algébrique des débits qui résultent des calculs faits sur les polygones qui se situent sur la limite initiale de la cellule avec ses deux bords, gauche et droit, avant le début de la crue. Cette approche requiert donc d'identifier les données liées à chaque rive.

4.1.6 Présentation des données

La présentation des données a la forme matricielle. Chaque type de données est présenté par une matrice dont le nombre de lignes est égal au nombre de lignes parallèles au profil de l'écoulement et le nombre de colonnes est égal au nombre des axes verticaux. À noter ici que le mode de la présentation des coordonnées et des paramètres hydrauliques dans les matrices globales n'est pas le même pour les deux bords.

4.1.6. A : Données du bord gauche

Les données des points d'intersection, entre les axes tracés sur le bord gauche, sont caractérisées par des matrices globales de taille [7 x 8]. Avec un levé topographique connu et une utilisation d'AUTOCAD ou un autre logiciel ayant les fonctions qui permettront d'identifier les coordonnées des points extrêmes des lignes tracées en 3D, on peut construire les matrices de toutes les données requises au calcul.

Une fois les courbes de niveau figurées sur la carte géographique de la région étudiée sont connues, on peut tracer les lignes des axes verticaux et horizontaux en donnant aux extrémités des lignes les élévations tangentielles à la surface supérieure des courbes de niveau.

On peut aussi calculer les niveaux des points d'intersection par une interpolation linéaire entre deux points voisins et dont les coordonnées (x, y, z) sont connues.

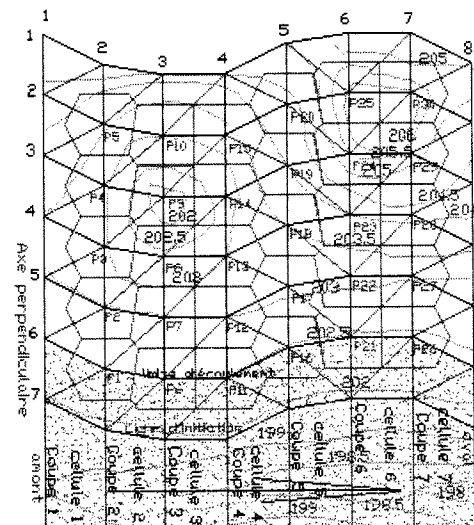


Figure 4,6: présentation matricielle du bord gauche

	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
Matrice des abscisses aux	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
points d'intersection entre	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
les axes verticaux et	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
horizontaux tracés sur le	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
bord gauche	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500

	5000	4850	4800	4800	4950	5000	5000	4850
	4700	4550	4500	4500	4650	4700	4700	4550
	4400	4250	4200	4200	4350	4400	4400	4250
	4100	3950	3900	3900	4050	4100	4100	3950
	3800	3650	3600	3600	3750	3800	3800	3650
	3500	3350	3300	3300	3450	3500	3500	3350
	3200	3050	3000	3000	3150	3200	3200	3050
	205	204.7	204.5	204.5	205	204.7	204.5	204.8
	204	203.6	203.1	203.3	204.4	206	206	204.8
	203.1	203.1	202	203	203.5	205.3	205.3	204.3
	202.85	202.8	202.75	202.9	202.85	203	203.05	203.6
	202.65	202.6	202.65	202.7	202.6	202.55	202.5	202.45
	202.5	202.47	202.44	202.41	202.38	202.35	202.32	202.29
	201.9	201.5	201.5	201	201.5	201.5	201.5	202
	0.02	0.018	0.019	0.022	0.025	0.027	0.03	0.032
	0.021	0.02	0.017	0.02	0.023	0.024	0.028	0.03
	0.018	0.022	0.015	0.018	0.02	0.022	0.026	0.027
	0.015	0.024	0.018	0.02	0.024	0.025	0.025	0.026
	0.018	0.022	0.02	0.02	0.021	0.021	0.022	0.023
	0.02	0.02	0.022	0.023	0.02	0.018	0.02	0.021
	0.017	0.018	0.02	0.02	0.019	0.017	0.019	0.02
	205	204.7	204.5	204.5	205	204.7	204.5	204.8
	204	203.6	203.1	203.3	204.4	206	206	204.8
	203.1	203.1	202	203	203.5	205.3	205.3	204.3
	202.85	202.8	202.75	202.9	202.85	203	203.05	203.6
	202.65	202.6	202.65	202.7	202.6	202.55	202.5	202.45
	202.5	202.47	202.44	202.41	202.38	202.35	202.32	202.29
	202.5	202.47	202.44	202.41	202.38	202.35	202.32	202.29

Matrice des concentrations	0	0	0	0	0	0	0	0
en agents polluant aux	0	0	50	0	0	0	0	0
points d'intersection entre	0	0	0	0	50	0	0	0
les axes verticaux et	0	50	0	0	0	0	50	0
horizontaux tracés sur le	0	0	0	50	0	50	0	0
bord gauche	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

4.1.6. B : Données du bord droit

La méthode de calcul, suivie dans le programme informatique développé pour cette fin, impose de localiser le premier polygone en bas et à gauche de la matrice globale de donnée. C'est pourquoi, on effectue une rotation de 180 degrés du plan de la carte par rapport à l'axe de l'écoulement longitudinal. Celle-ci nous amène à la présentation virtuelle suivante.

Présentation de la subdivision polygonale faite sur le bord droit de l'écoulement

Présentation symétrique par rapport à l'horizontal de la subdivision polygonale sur le bord droit

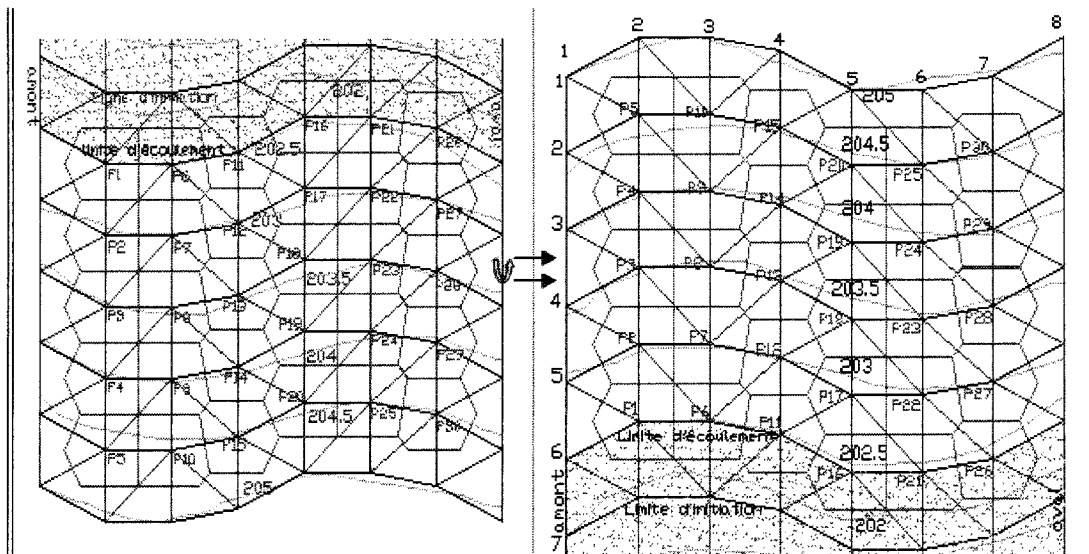


Figure 4,7: Présentation virtuelle de la subdivision polygonale symétrique appliquée sur le bord droit

Les matrices des paramètres géométriques, présentées ci-dessous, auront alors la taille [7 x 8];

	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
Matrice des abscisses aux	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
points d'intersection (en	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
symétrie) entre les axes	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
verticaux et horizontaux	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
tracés sur le bord droit	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500

	700	550	550	600	750	750	700	550
Matrice des ordonnées aux	1000	850	850	900	1050	1050	1000	850
points d'intersection (en	1300	1150	1150	1200	1350	1350	1300	1150
symétrie) entre les axes	1600	1450	1450	1500	1650	1650	1600	1450
verticaux et horizontaux	1900	1750	1750	1800	1950	1950	1900	1750
tracés sur le bord droit	2200	2050	2050	2100	2250	2250	2200	2050
	2500	2350	2350	2400	2550	2550	2500	2350

	205	205.15	205	205.2	204.95	204.9	204.95	205.2
Matrice des niveaux du	204.6	204.7	204.6	204.5	204.4	204.1	204	203.65
sol aux points	203.4	203.2	203.1	203	202.95	203	203.1	202.95
d'intersection entre les	202.9	202.7	202.75	202.7	202.65	202.65	202.6	202.55
axes verticaux et	202.65	202.6	202.65	202.7	202.6	202.55	202.5	202.45
horizontaux tracés sur le	202.5	202.47	202.44	202.41	202.38	202.35	202.32	202.29
bord droit	202	201.5	201	201.15	200.25	199.8	199.6	199.8

	0.018	0.022	0.015	0.018	0.02	0.022	0.026	0.027
Matrice des coefficients	0.02	0.018	0.019	0.022	0.025	0.027	0.03	0.032
de rugosité aux points	0.018	0.022	0.02	0.02	0.021	0.021	0.022	0.023
d'intersection entre les	0.02	0.02	0.022	0.023	0.02	0.018	0.02	0.021
axes verticaux et	0.017	0.018	0.02	0.02	0.019	0.017	0.019	0.02
horizontaux tracés sur le	0.015	0.024	0.018	0.02	0.024	0.025	0.025	0.026
bord droit	0.021	0.02	0.017	0.02	0.023	0.024	0.028	0.03

	205	205.15	205	205.2	204.95	204.9	204.95	205.2
Matrice des hauteurs d'eau	204.6	204.7	204.6	204.5	204.4	204.1	204	203.65
aux points d'intersection (en	203.4	203.2	203.1	203	202.95	203	203.1	202.95
symétrie) entre les axes	202.9	202.7	202.75	202.7	202.65	202.65	202.6	202.55
verticaux et horizontaux	202.65	202.6	202.65	202.7	202.6	202.55	202.5	202.45
tracés sur le bord droit	202.5	202.47	202.44	202.41	202.38	202.35	202.32	202.29
	202.5	202.47	202.44	202.41	202.38	202.35	202.32	202.29
Matrice des concentrations	0	0	0	0	0	0	0	0
en agents polluant aux	0	0	50	0	0	0	0	0
points d'intersection (en	0	0	0	0	50	0	0	0
symétrie) entre les axes	0	50	0	0	0	0	50	0
verticaux et horizontaux	0	0	0	50	0	50	0	0
tracés sur le bord droit	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

4.1.7 Coordonnées des points périphériques de polygones

Le calcul des paramètres géométriques d'un polygone se base sur la détermination des coordonnées des points d'intersection entre les segments situés sur le contour du polygone. Et sachant que ces segments sont les médiatrices de toutes les droites qui lient le centre du polygone avec les points situés sur le contour des quatre parallélogrammes entourant le centre du polygone, le calcul des points du pourtour d'un polygone se déduit avec l'utilisation de l'équation d'une droite en fonction de coordonnées de deux points données. De plus, on se sert de la relation entre les deux pentes de deux droites perpendiculaires.

On expliquera, à travers l'application numérique du polygone (P1), la subdivision polygonale faite sur le bord gauche et la façon à suivre pour calculer les coordonnées des points demandées.

En premier, on montre dans la figure suivante toutes les coordonnées connues des neuf points (A, B, C, D, E, F, G, H et O) qui forment les quatre parallélogrammes qui entourent le centre du polygone.

Les points [1], [3], [5], [7], [9] et [11] sont respectivement les milieux des droites OH, OB, OC, OD, OF et OG. Les coordonnées des points cités ci-dessus sont :

[1] (1700, 4400)

[3] (1850, 4525)

[5] (1850, 4675)

[7] (1700, 4700)

[9] (1550, 4625)

[11] (1550, 4475)

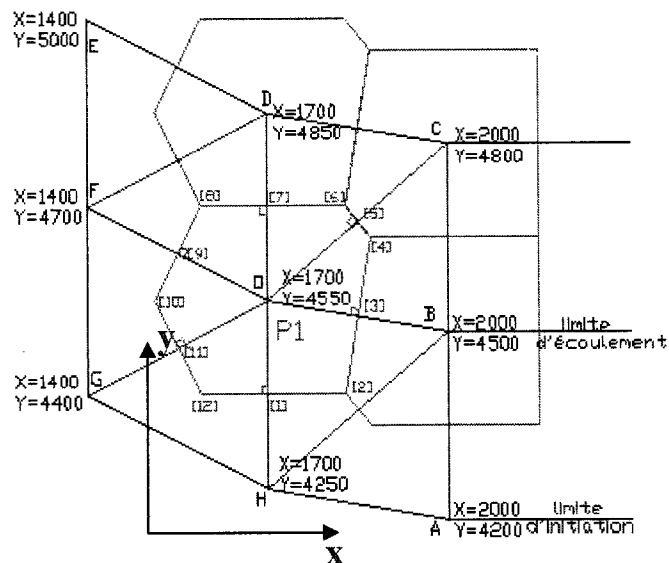


Figure 4,8: Géométrie du polygone P1 (bord gauche)

À rappeler que les formules géométriques utilisées pour déterminer les coordonnées des points situés sur le pourtour du polygone sont :

- $m_1, m_2 = -1$ où m_1 et m_2 sont les pentes des deux droites perpendiculaires,
- l'équation d'une droite en fonction des deux points donnés :

$$y_1 - y_2 = m (x_1 - x_2).$$

⇒ Pour calculer, par exemple, les coordonnées du point [2] :

On applique, en premier lieu, les équations géométriques écrites ci-dessus pour déterminer les équations des droites [1][2] et [2][3]. Ensuite on égalise les deux équations et on déduit les coordonnées du point d'intersection [2].

La même procédure est faite pour calculer les coordonnées des points [4], [6], [8], [10] et [12]. En somme, les coordonnées de tous les points périphériques du polygone seront :

[1] (1700, 4400)	[2] (1829.17, 4400)
[3] (1850, 4525)	[4] (1870.83, 4651.67)
[5] (1850, 4675)	[6] (1700, 4701.67)
[7] (1700, 4700)	[8] (1587.5, 4701.67)
[9] (1550, 4625)	[10] (1512.5, 4551.67)
[11] (1550, 4475)	[12] (1587.5, 4400)

La démarche détaillée au début de ce paragraphe se répète pour tous les polygones de la subdivision.

4.2 Calcul des paramètres géométriques de polygones

4.2.1 Calcul des aires horizontales de polygones

Pour calculer, par exemple, l'aire du polygone P1, on applique tout simplement la formule topométrique : $A = \sum ((X_{i+1} - X_i) * (Y_{i+1} + Y_i) / 2)$

$$\begin{aligned} \text{Aire (P1)} = & [(X[2] - X[12]) * (Y[2] + Y[12]) / 2] + [(X[4] - X[2]) * (Y[4] + Y[2]) / 2] \\ & [(X[6] - X[4]) * (Y[6] + Y[4]) / 2] + [(X[8] - X[6]) * (Y[8] + Y[6]) / 2] \\ & [(X[10] - X[8]) * (Y[10] + Y[8]) / 2] + [(X[12] - X[10]) * (Y[12] + Y[10]) / 2] ; \end{aligned}$$

L'application numérique dans notre exemple nous donne : Aire (P1) = $9 \cdot 10^4 \text{ m}^2$

4.2.2 Calcul des longueurs des frontières périphériques de polygones

Les longueurs des frontières sont désignées par Lf1, Lf2, Lf3, Lf4, Lf5 et Lf6 qui sont les longueurs des droites [12][2], [2][4], [4][6], [6][8], [8][10] et [10][12] (voir figure 4,8).

Par hypothèse, les longueurs de ces frontières sont respectivement les largeurs d'écoulement entre les points : O-H, O-B, O-C, O-D, O-F et O-G.

4.3 Application numérique du calcul hydraulique

Trois phases principales caractérisent le mode de calcul proposé; il s'agit de l'analyse unidimensionnelle, analyse de débordement ou découverture de l'eau inondée sur les bords et l'analyse de la propagation des agents polluants.

4.3.1 Analyse unidimensionnelle

Tout d'abord, on part de l'état initial avant le début de la crue. Selon les données fournies, le débit initial d'eau en amont de la région étudiée est de $1346 \text{ m}^3/\text{s}$ (avec $A_{\text{section}} = 2383 \text{ m}^2$ et $P_{\text{mouillé}} = 1984 \text{ m}$). Ce débit, supposé dans le modèle d'application, reste, selon la loi de la conservation de masse, inchangé le long de la ligne d'écoulement. La hauteur d'eau en amont est 202.5 m par rapport au repère fixé. Ensuite, et connaissant connu le taux de croissance du débit en amont, l'aire de la section mouillée, le périmètre mouillé, la profondeur d'eau et le coefficient de rugosité en amont, on a pu calculer la vitesse de l'écoulement, la célérité et la variation de profondeur d'eau qui nous ont permis par la suite de déterminer le temps nécessaire pour que l'eau traverse la cellule et déduire le pas de temps.

$$\Delta t = 0.9 \cdot \Delta x / V_f \text{ avec } V_f = V_{\text{écoulement}} + 2 \cdot (g \cdot (A / T))^{1/2}$$

Δx : distance qui sépare les sections verticales; ($\Delta x = 300 \text{ m}$)

V_f : la somme de la vitesse d'écoulement longitudinal et la célérité;

A : aire de la section verticale;

T : largeur superficielle de la section.

Une application numérique des données fournies nous donne un pas de temps $\Delta t \approx 20$ secondes.

4.3.2 Analyse de débordement ou découverture des bords

Il est primordial de mentionner que les variations des volumes qui résultent du calcul des polygones situés sur les limites initiales de l'eau avec les deux bords avant le début de la crue servent à corriger les niveaux

calculés par l'analyse unidimensionnelle des cellules situées entre les coupes transversales du fleuve ou de la rivière.

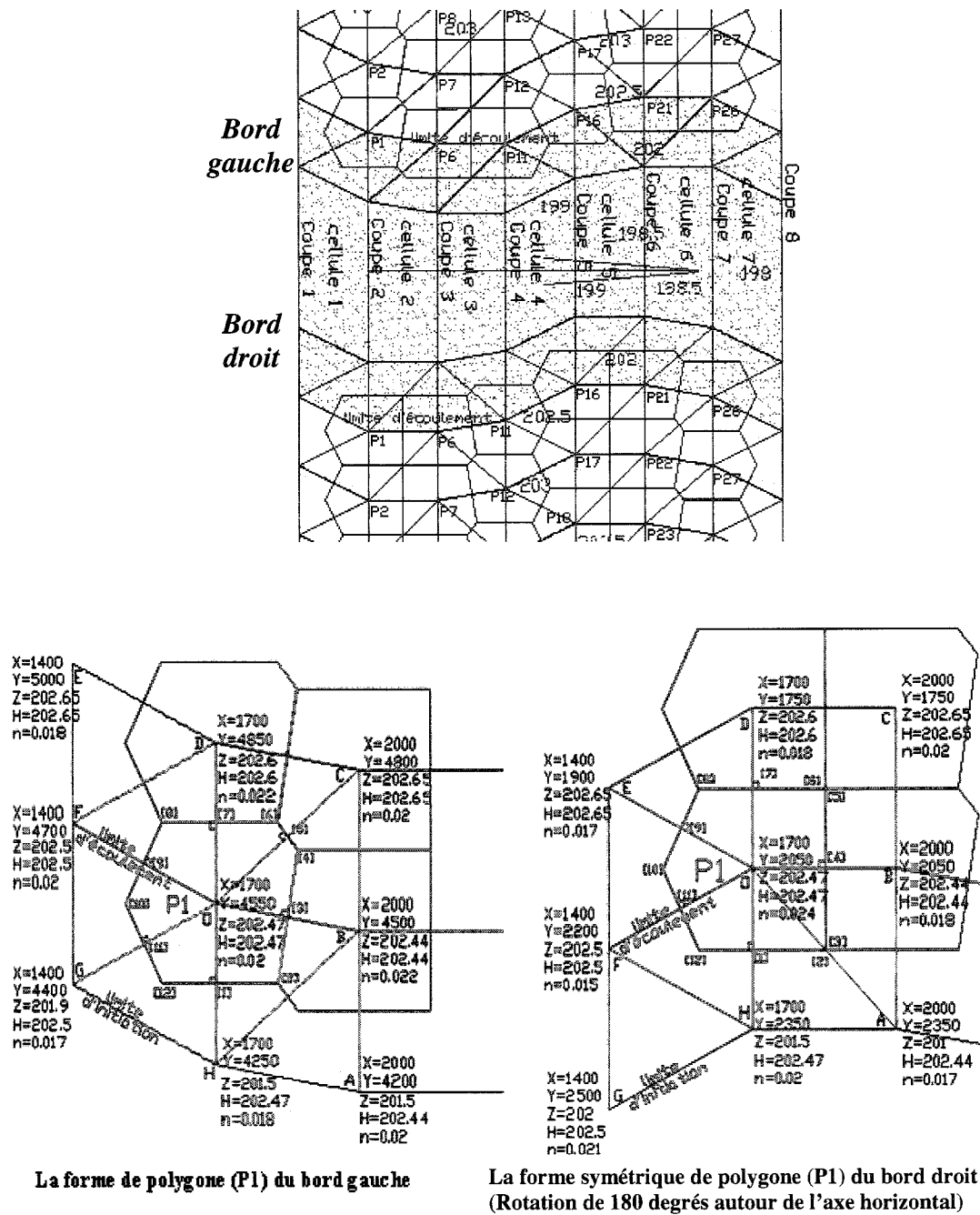


Figure 4,9: Données géométriques et hydrauliques requises pour l'analyse des polygones

À titre de démonstration, on appliquera la méthode expliquée ci-dessus sur les polygones nommés (P1) dans les plans du bord gauche et droit. La figure 4,9 montre les données géométriques des deux polygones ainsi que les données hydrauliques requises pour calculer les volumes transmis par les lignes d'écoulement générées dans les deux polygones;

L'exemple suivant illustre la démarche de calcul suivie, et ce, après avoir donné les formules utilisées pour déterminer les variables de calcul.

Les largeurs des frontières dans les deux polygones, nommés P1 (voir figure 4,9), sont calculées par le programme développé pour la modélisation. Le calcul nous donne les résultats suivants :

Soit : L_f est la largeur de la frontière d'écoulement entre deux points extrêmes d'une ligne d'écoulement;

<i>Bord gauche (Polygone P1) [m]</i>	<i>Bord droit (Polygone P1) [m]</i>
$L_{f1} = [12][2] = 241.67$ $L_{f4} = [6][8] = 241.67$	$L_{f1} = [12][2] = 262.51$ $L_{f4} = [6][8] = 262.51$
$L_{f2} = [2][4] = 253.46$ $L_{f5} = [8][10] = 167.72$	$L_{f2} = [2][4] = 150$ $L_{f5} = [8][10] = 167.72$
$L_{f3} = [4][6] = 65.07$ $L_{f6} = [10][12] = 167.69$	$L_{f3} = [4][6] = 150$ $L_{f6} = [10][12] = 167.69$

$$D = [(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2]^{1/2}$$

D : Distance linéaire qui sépare deux points extrêmes d'une ligne d'écoulement;

$$S = (H_1 - H_2) / D$$

S : Pente de la ligne d'eau entre deux points extrêmes d'une ligne d'écoulement;

$$n_m = (n_1 + n_2) / 2$$

n_m : Rugosité moyenne des deux points extrêmes d'une ligne d'écoulement;

$$h_m = [(H_1 - Z_1) + (H_2 - Z_2)] / 2$$

h_m : Profondeur moyenne d'eau des deux points extrêmes d'une ligne d'écoulement;
 Dans le cas où la profondeur d'eau au point d'arrivée est nulle, la profondeur moyenne sera la moitié de la profondeur d'eau au point de départ. $h_m = (H_1 - Z_1) / 2$

$$V = h_m^{2/3} * S^{1/2} / n_m$$

V : Vitesse moyenne de l'écoulement entre deux points extrêmes d'une ligne d'eau;

$$Vol = V * h_m * L_f * \Delta t$$

Vol : Volume d'eau transmis durant un temps Δt ;

(**N.B** : Le signe du volume sortant calculé est négatif alors que celui du volume entrant est positif)

Une fois le volume sortant ou entrant est calculé, on peut déduire le changement de niveau au centre du polygone;

$$dh = Vol / A_{\text{polygone}} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow H_t \text{ (au point O)} = H_{t - \Delta t} \text{ (au point O)} + dh$$

Bord	Polygone	Points	X	Y	Z	H	n
Gauche	1	O	1700	4550	202.47	202.47	0.02
		A	2000	4200	201.5	202.44	0.02
		B	2000	4500	202.44	202.44	0.022
		C	2000	4800	202.65	202.65	0.02
		D	1700	4850	202.6	202.6	0.022
		E	1400	5000	202.65	202.65	0.018
		F	1400	4700	202.5	202.5	0.02
		G	1400	4400	201.9	202.5	0.017
		H	1700	4250	201.5	202.47	0.018

Bord	Polygone	Points	X	Y	Z	H	n
Droite	1	O	1700	2050	202.47	202.47	0.024
		A	2000	2350	201	202.44	0.017
		B	2000	2050	202.44	202.44	0.018
		C	2000	1750	202.65	202.65	0.02
		D	1700	1750	202.6	202.6	0.018
		E	1400	1900	202.65	202.65	0.017
		F	1400	2200	202.5	202.5	0.015
		G	1400	2500	202	202.5	0.021
		H	1700	2350	201.5	202.47	0.02

Bord	Polygone	Points extrêmes	L _r (m)	D (m)	S (m/m)	n _m	h _m (m)	V (m/s)	Vol (m ³)
Gauche	1	O → H	241,67	300	0	0,019	0,002943	0	0
		O → B	253,46	304,1381	-9,86394E-05	0,021	0,002943	-0,00971	-0,079678734
		O → C	65,06	390,5125	0,000453397	0,02	0,001471	0,013773	0,014502204
		O → D	241,67	300	0,000423524	0,021	0,001471	0,012677	0,049585321
		O → F	167,7	335,4102	8,94427E-05	0,02	0,002943	0,00971	0,05271117
		O → G	167,7	335,4102	0,000178885	0,0185	0,002943	0,014846	0,080589029
Droite	1	O → H	262,5	300	0	0,022	0,002943	0	0
		O → A	150	424,2641	-7,07107E-05	0,0205	0,002943	-0,00842	-0,040898464
		O → B	150	300	-0,0001	0,021	0,002943	-0,00978	-0,047478726
		O → D	262,5	300	0,000423524	0,021	0,001471	0,012677	0,053859175
		O → E	167,71	335,4102	0,000527883	0,0205	0,001471	0,014498	0,039353591
		O → F	167,71	335,4102	8,94427E-05	0,0195	0,002943	0,009959	0,054065963
Σ(±Vol)								0,176610528	
A _{polygone}								90000	
Δh (en O)								1,96234E-06	

<p>Δt (secondes) = 20</p> <p>dh (par calcul unidimensionnel)</p> <p>0.002944664</p> <p>dh (corrigée)</p> <p>0,002942626</p> <p>dh (corrigée) = dh (unidimensionnel) + Δh (en O)</p>	<p>Le niveau en O dans le polygone 1 après 20 secondes de crue</p> <p>H_{finale} (en O) = H (en O) + dh (corrigée)</p> <p>H_{finale} (en O) =</p> <p>202,4758873</p>
--	--

Il est utile de rappeler que les niveaux superficiels des coupes transversales faites sur la ligne initiale de l'écoulement longitudinal sont toujours, par hypothèse, supposés horizontaux. C'est pourquoi, on trouve que dans les polygones, qui limitent les bords de l'eau avec les rives avant la crue, les niveaux des points O, A, B, F, G et H sont tels que : (H_F=H_G; H_O=H_H et H_B=H_A).

Cette hypothèse requiert donc de corriger les niveaux des points situés sur les lignes d'initiation qui sont parallèles au profil longitudinal du cours d'eau, et ceci à la fin de chaque Δt avant de commencer l'analyse du pas de temps suivant.

Les résultats totaux de la modélisation de débordement et de découverture seront figurés dans la section de l'interprétation des résultats.

4.3.3 Analyse de la propagation des agents polluants par la crue

La propagation des polluants sur les rives du cours d'eau est une des conséquences qui résultent durant et après la crue. Cette affectation, causée par la présence des agents polluants dans des zones de la rive inondée, est estimée par l'application de la loi de conservation de masse. La détermination des concentrations instantanées se base sur le calcul des vitesses de diffusion et de transport. Une fois ces vitesses sont calculées, on peut estimer les volumes transmis dont les concentrations en polluants sont connues à la fin du pas précédent.

À chaque pas de temps, on fait la somme algébrique des masses disponibles avant le début de Δt avec les masses entrantes et sortantes par la diffusion et le transport. Ensuite, la masse des polluants restés dans le volume situé à l'intérieur du polygone nous aboutit à déduire la concentration instantanée des polluants dans le polygone analysé, et ceci en divisant tout simplement cette masse sur le volume disponible en eau.

On va expliquer la démarche à suivre dans l'exemple de calcul suivant. Là, on attire l'attention que cette étape de calcul se place impérativement après l'étape de l'analyse de débordement car la vitesse du transport est considérée la même que celle de l'écoulement qui est déjà trouvée dans l'étape précédente.

Dans notre exemple, on songe à montrer le mode de calcul proposé par cette étude pour estimer le changement de la concentration en polluants dans

le polygone P13 du plan de bord gauche (voir la figure 4,10). Le pas de temps choisi ($\Delta t=20$ sec) est pris après environ 6 heures de crue avec une majoration de débit en amont de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. La figure suivante montre la situation hydraulique et pollutionnelle du polygone P13 du bord gauche :

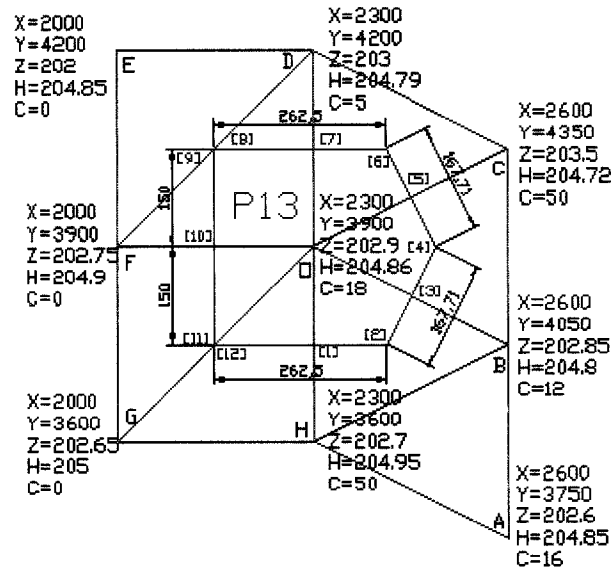


Figure 4,10: Données du polygone P13 après 6 heures de crue

Calcul Hydraulique :

Tout d'abord, on commence par résumer dans le tableau suivant les données géométriques, hydrauliques et pollutionnelles des points qui mènent au calcul des points limitant le polygone P13.

Bord	Polygone	Points	X	Y	Z	H	n	Concentration (g/m^3)
Gauche	13	O	2300	3900	202.9	204.86	0.02	18
		A	2600	3750	202.6	204.85	0.021	16
		B	2600	4050	202.85	204.8	0.024	12
		C	2600	4350	203.5	204.72	0.02	50
		D	2300	4200	203	204.79	0.018	5
		E	2000	4200	202	204.85	0.015	0
		F	2000	3900	202.75	204.9	0.018	0
		G	2000	3600	202.65	205	0.02	0
		H	2300	4250	202.7	204.95	0.02	50

En se basant sur les données ci-dessus, on calcule les six vitesses de transport produites par la différence de niveau d'eau entre le centre du

polygone O et les points périphériques. Le calcul de ces vitesses se résume dans le tableau suivant :

Bord	Numéro de Polygone	Points extrêmes	pente de fluide S (m/m)	Coef. de Manning n_m	Prof. Moy. h_m (m)	Vitesse de transport (m/s) $V = h^{2/3} * S^{1/2} / n$
Gauche	13	O → H	0,000257	0.02	2,105	1,316917707
		O → B	-0,00017	0.022	1,955	-0,950523054
		O → C	-0,00025	0.02	1,59	-1,095890858
		O → D	-0,00023	0.019	1,875	-1,222462765
		O → F	0,000133	0.019	2,055	0,982329044
		O → G	0,000329	0.02	2,155	1,515353927

Quant à la quantité de diffusion, le sens de cette diffusion est du point qui présente la concentration la plus grande en polluants vers le point possédant la plus petite concentration entre ce point et l'autre point de la ligne d'écoulement. C'est pourquoi, le signe de cette vitesse est positif si la concentration au point O est plus grande et il est négatif si le contraire.

Bref, les formules qui mènent au calcul de la quantité de diffusion et les constantes qui correspondent au cas de notre exemple sont:

$$V_D = \frac{(C_1 - C_2)}{\Delta S} \cdot D$$

$$D = D_0 + D^* \quad \text{Avec} \quad D^* = C \cdot h \cdot u^* \quad \text{Où}$$

$$u^* = \left(\frac{Z_0}{\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{\gamma \cdot h \cdot S_f}{\rho} \right)^{1/2} = \left(g \cdot h \cdot S_f \right)^{1/2}$$

Dans notre cas, et comme le polluant choisi est l'engrais, on pose $D_0=0.48(m^2/s)$ et $C = 0.16$ (ces deux valeurs sont données par le site de l'organisation internationale « *fao* » : (www.fao.org)

Les calculs suivants, qui correspondent au polygone (P 13), montrent les applications numériques des formules écrites ci-dessus :

Bord	Polygone	Points extrêmes	Prof. Moyenne h_m (m)	Pente de fluide S_r	$u^*=(g \cdot h^3 \cdot S_r)^{1/2}$ ($g=9.81m/s^2$) Vitesse de cisaillement	$D^* = C \cdot h_m \cdot u^*$ soit la constante $C=0.16$	$D = D_0 + D^*$ soit la constante $D_0 = 0.48$
Gauche	13	O → H	1.905	0.000257143	0.069321703	0.021129255	0.501129255
		O → B	1.58	-0.000178885	-0.052656325	-0.013311519	0.466688481
		O → C	1.29	-0.00025886	-0.057235029	-0.01181331	0.46818669
		O → D	1.95	-0.000233333	-0.066809805	-0.020844659	0.459155341
		O → F	2.08	0.000133333	0.052159755	0.017358766	0.497358766
		O → G	1.955	0.000329983	0.07955249	0.024884019	0.504884019

Bord	Polygone	Points extrêmes	Distance entre les points ΔS (m)	$D = D_0 + D^*$ soit la constante $D_0 = 0.48$	Concentration n au point O (g/m^3)	Concentration de l'autre point (g/m^3)	quantité de diffusion V_D ($g/m^2.s$)
Gauche	13	O → H	350	0.501129255	18	0	0.025772362
		O → B	335.41	0.466688481	18	12	-0.008348382
		O → C	540.83	0.46818669	18	50	0.027701818
		O → D	300	0.459155341	18	5	-0.019896731
		O → F	300	0.497358766	18	0	0.029841526
		O → G	424.26	0.504884019	18	0	0.02142062

Bord	Polygone	Points extrêmes	Largeur des frontières L_f (m)	Prof. Moyenne h_m (m)	quantité de diffusion V_D ($g/m^2.s$)	Masse par diffusion (g) $M1=V_D \cdot L_f \cdot h_m \cdot \Delta t$ ($\Delta t = 20$ sec)
Gauche	13	O → H	262,5	2,105	0,025947903	286,7567642
		O → B	167,71	1,955	-0,00825876	-54,15649721
		O → C	167,71	1,59	0,02744432	146,3654442
		O → D	162,5	1,875	-0,01994833	-121,5601893
		O → F	150	2,055	0,029822805	183,8575929
		O → G	150	2,155	0,021586703	139,5580362

Bord	Polygone	Points extrêmes	Largeur des frontières L_f (m)	Prof. Moyenne h_m (m)	vitesse de transport V_t	Concentration des volumes transmis (g/m^3)	Masse par transport (g) $M2=Vt^* Lf^*hm^*C^*\Delta t$ ($\Delta t=20$ s)
Gauche	13	O → H	262,5	2,105	1,316917707	50	727679,3402
		O → B	167,71	1,955	-0,950523054	18	-112194,3215
		O → C	167,71	1,59	-1,095890858	18	-105202,4583
		O → D	162,5	1,875	-1,222462765	18	-134088,8845
		O → F	150	2,055	0,982329044	0	0
		O → G	150	2,155	1,515353927	0	0

Bord	Polygone	Points extrêmes	Masse par diffusion $M1=VD^*Lf^*hm^*\Delta t$	Masse par transport (g) $M2=Vt^*Lf^*hm^*C^*\Delta t$ ($\Delta t=20$ s)	Masse totale transmise = $M1+M2$
Gauche	13	O → H	286,7567642	727679,3402	727966,097
		O → B	-54,15649721	-112194,3215	-112248,478
		O → C	146,3654442	-105202,4583	-105056,0928
		O → D	-121,5601893	-134088,8845	-134210,4447
		O → F	183,8575929	0	183,8575929
		O → G	139,5580362	0	139,5580362
	a	$\Sigma(\Sigma \text{masses transmises à l'intérieur du polygone})$ (g) =			376774,4971
		Volume initial en eau = $(H_o - Z_o)^* \text{Aire}_{\text{polygone}}$			167400
	b	masse initiale = volume initial * conc. Initiale			3175200
		Or la concentration initiale du polygone =			18
		dh: changement de niveau après $\Delta t=20\text{sec}$			0,03
	c	volume final = Volume initial + $dh^* \text{Aire}_{\text{(polygone)}}$			179100
		Concentration finale (g/m^3) = $(a+b) / c$			19,83

L'exemple du polygone P13 nous montre alors une augmentation de 1.83 g/m³ des agents polluants dans le volume d'eau situé à l'intérieur du polygone. Cette augmentation se résulte après le découlement du temps Δt . Cette démarche, qui se répète pour tous les polygones et à chaque pas du temps, va nous permettre de tracer un spectre horizontal des limites externes des zones polluées. On verra, dans la section de l'interprétation des résultats, les graphes de ces limites avec les des valeurs de concentration après la période de la simulation.

4.4 Résultats des simulations

Les exemples de calculs numériques présentés dans la partie précédente de ce chapitre sont les exemples types de calcul qui se fait pour chaque polygone de la subdivision. Pour illustrer une visualisation significative de l'expansion des deux limites du cours d'eau sur ses bords, on a simulé le modèle à 2 heures, 4 heures, 6 heures, 8 heures, 10 heures et 12 heures. On a supposé une augmentation de débit en amont de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) au cours des six premières heures, ensuite une décrue de taux ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) durant les six heures suivantes.

Les résultats des six simulations sont figurés dans les annexes **B**, **C**, **D**, **E**, **F** et **G** à la fin de ce mémoire. On présentera ci-dessous les graphes qui montrent le développement des limites d'écoulement au cours des heures de simulation:

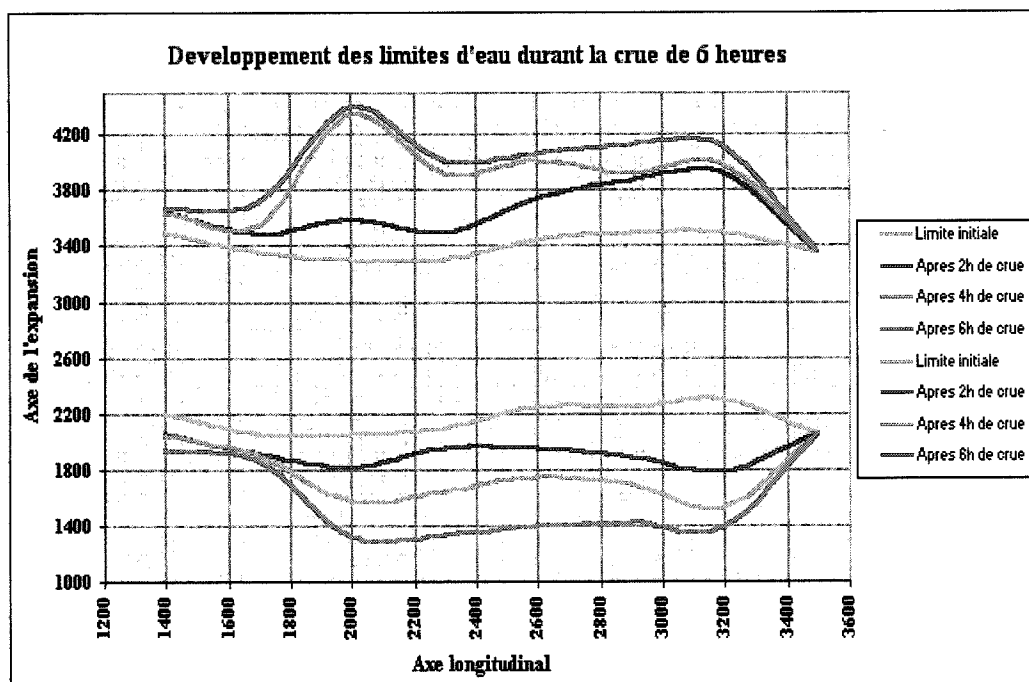


Figure 4,11: Variation des limites d'eau au cours des 6 premières heures de crue

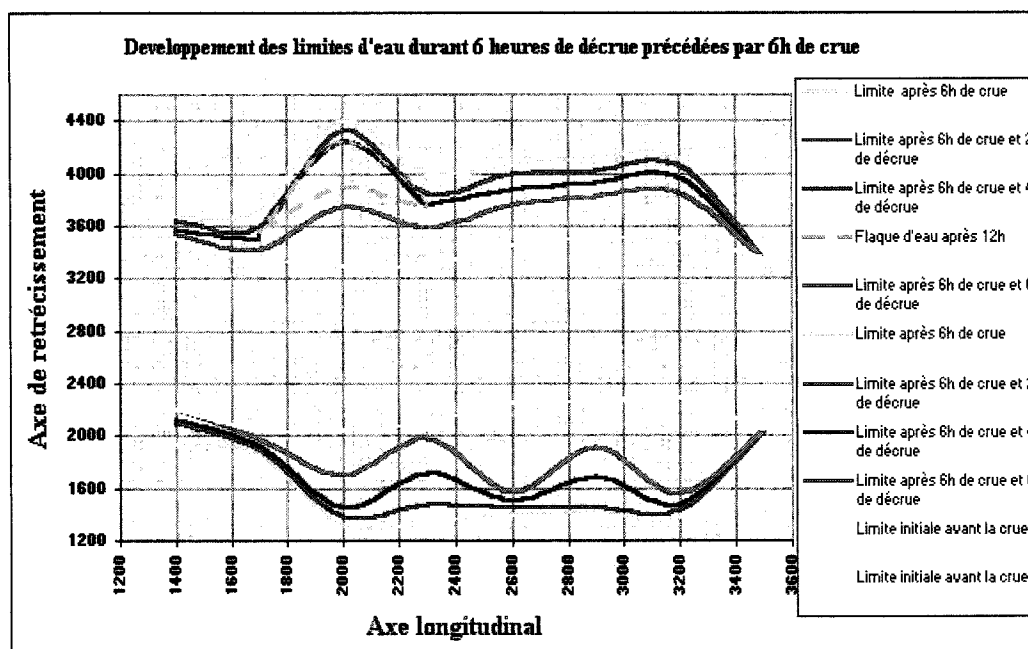


Figure 4,12: Variation des limites d'eau au cours des 6 heures de décrue

Les trois figures suivantes montrent respectivement, à $t = 0$, $t = 6$ heures et $t = 12$ heures) les limites des eaux polluées avec les concentrations en (g/m^3) des agents polluant dans les volumes d'eau situés sur les zones affectées des bords.

à $t = 0$ (avant le début de la crue)

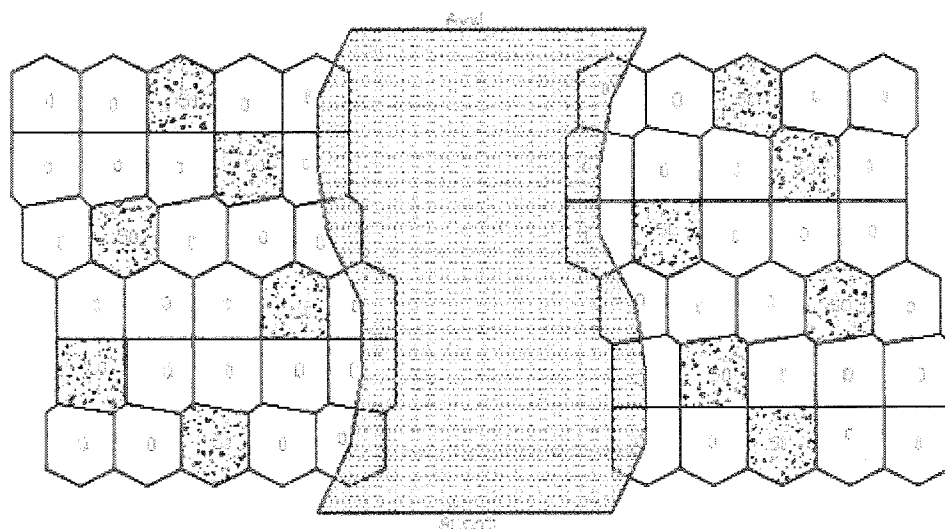


Figure 4,13 : État des limites d'eau avant le début de la crue

à t= 6 heures

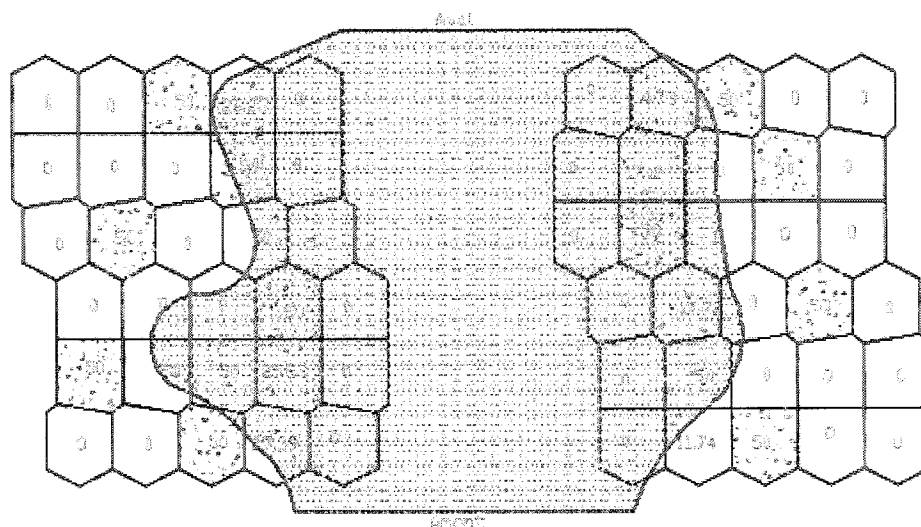


Figure 4,14: État des limites d'eau après 6 heures de crue

à t= 12 heures

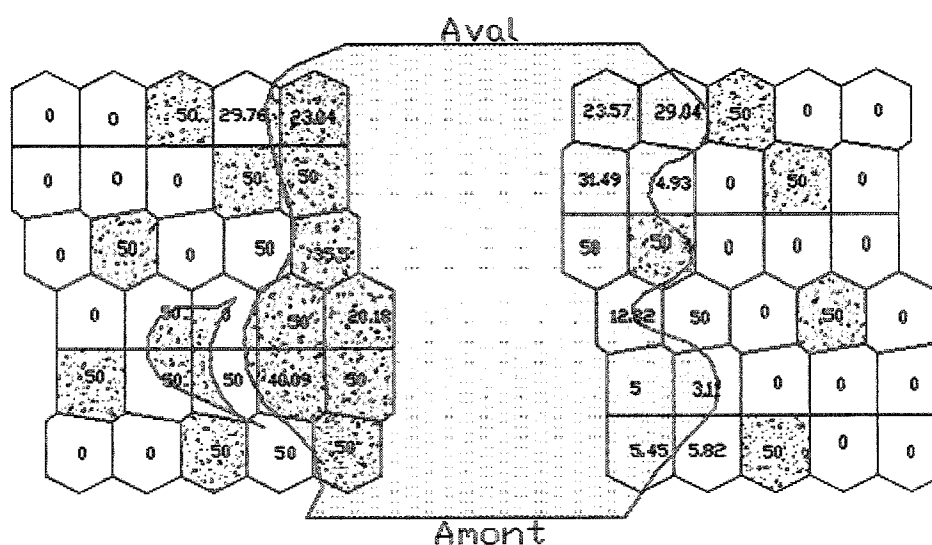


Figure 4,15: État des limites d'eau après 6 heures de crue suivies par 6 heures de décrue

4.5 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par la modélisation faite sur le modèle type et qui sont présentés par les cinq figures précédentes nous mènent à tirer les commentaires suivants:

- Les courbes caractérisant les limites de l'eau avec les bords admettent des allures très convenables avec le comportement attendu. On remarque que ces courbes sont compatibles avec la topographie et les données hydrauliques des points d'intersection entre les axes verticaux et horizontaux tracés. De plus, les concentrations obtenus dans les polygones à la fin de chaque durée de simulation sont aussi significatives par rapport aux concentrations fournies dans les données au temps $t=0$.
- Il est nécessaire de minimiser au maximum les espacements entre les axes, verticaux et parallèles au profil longitudinal de l'affluent, afin de diminuer l'écart de dénivellement entre le niveau d'eau au point du départ et le niveau du sol ou de l'eau au point d'arrivée. Cette minimisation sert aussi à approcher le comportement de l'inondation simulée avec celui de l'incident réel. Dans les différents modes de présentation, il est évident que plus le quadrillage des axes est affiné plus la modélisation possède une meilleure résolution. À noter que la présentation en 3D peut être faite avec l'écriture d'un *<script>* qui contient trois colonnes de données, soit les abscisses, les ordonnées et les concentrations en polluants. Ce script, qui est un fichier **.txt** sera exécuté dans **AUTOCAD** pour avoir une visualisation de l'état présenté.
- La séparation virtuelle entre les limites initiales de l'écoulement et celles résultantes de la propagation des ondes du débordement ou découverture affecte faiblement la précision des paramètres calculés

dans l'analyse unidimensionnelle qui se fait à chaque Δt . Mais, cette affectation sera atténuée par la correction du niveau de la cellule après avoir calculé les débits sortants ou entrants qui se déduisent à la fin de la deuxième phase d'analyse répétée à chaque Δt (analyse de débordement ou de découverture selon une méthode de contrôle des volumes) tout en se basant sur la loi de la conservation de masse.

- Au cours de la croissance du débit en amont, le pas de temps Δt diminue car ce pas est inversement proportionnel à la profondeur de l'écoulement.

$$\Delta t = \Delta x / (0.9 * (V_e + 2 * (g * A / T)^{1/2}))$$

A : Aire de la section;

Δx : distance horizontale séparant les sections transversales;

T : Largeur superficielle;

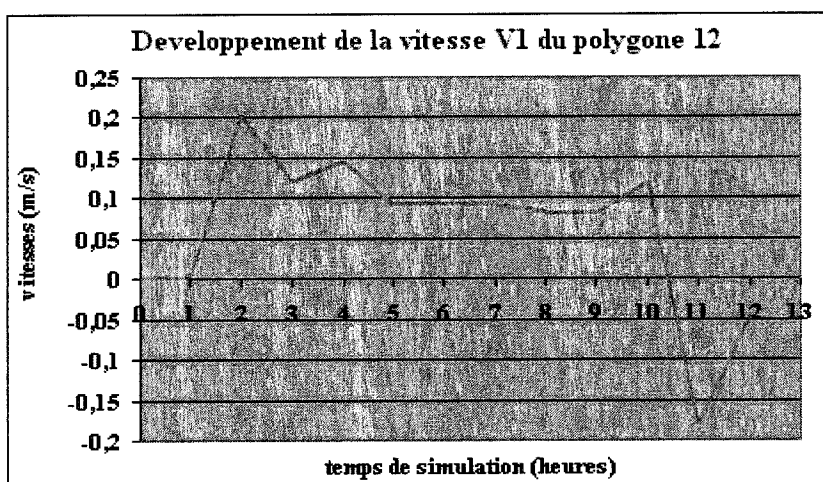
V_e : La somme de la vitesse d'écoulement et la célérité;

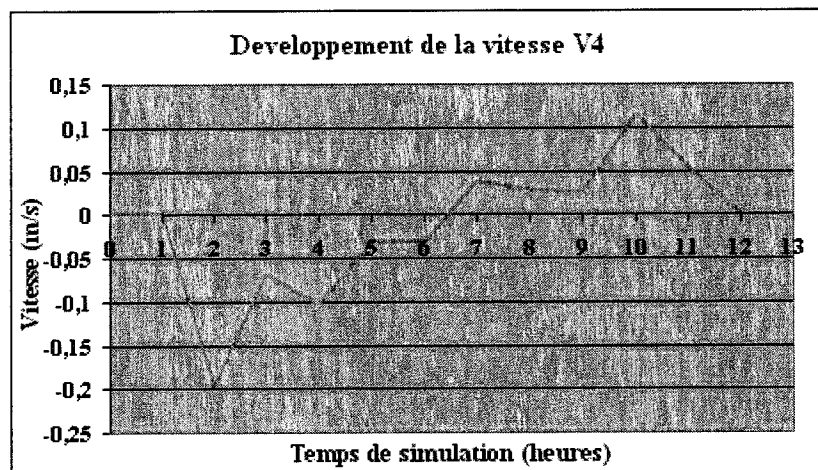
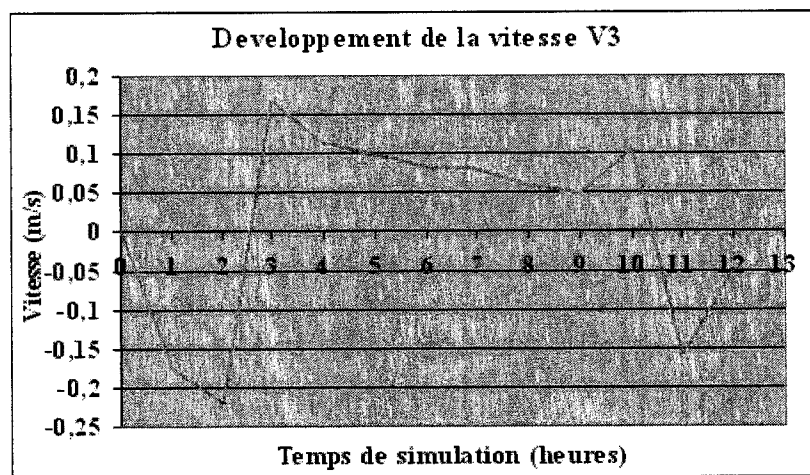
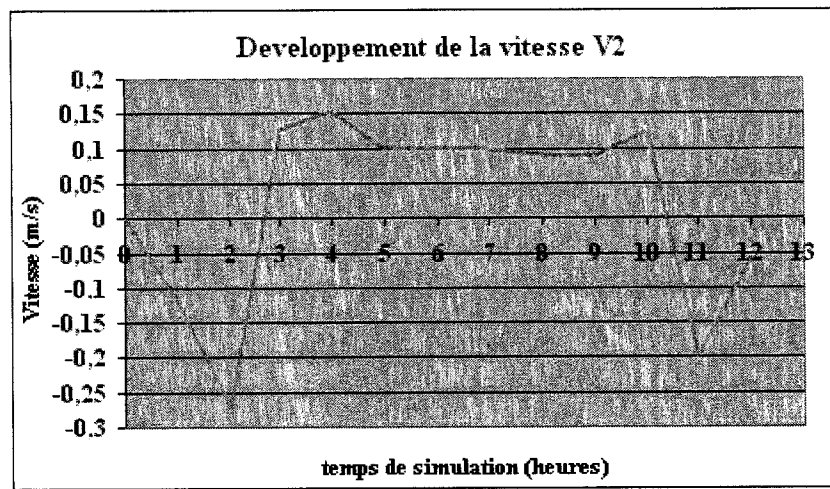
g : Accélération gravitationnelle.

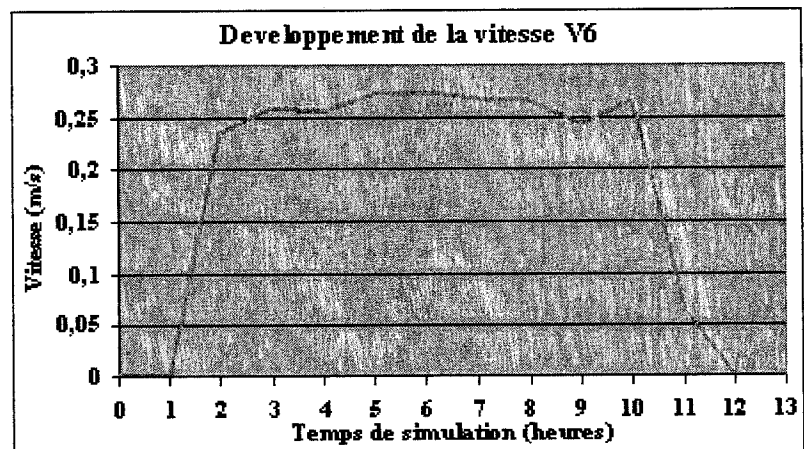
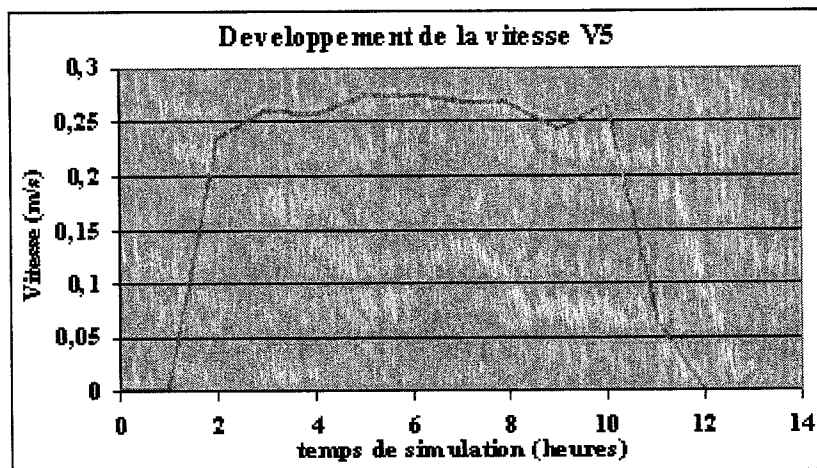
On note que le taux de la décroissance de Δt au cours de la crue est différent du taux de croissance de Δt au cours de la décrue. Cette différence est due à l'intervention des débits latéraux provenant des surfaces inondées. Ces débits atténuent l'effet de la décroissance du débit en amont.

- Durant la simulation et surtout après le passage de l'état de crue en décrue, la pollution de l'eau passant à l'intérieur de la limite initiale de l'écoulement, et qui se produit par l'évacuation des eaux polluées venant des bords inondés, est négligée dans l'analyse. Cette négligence affecte la précision de calcul des concentrations dans les polygones situés en aval de la cellule analysée du cours d'eau.

- Il est important de dire que l'écoulement hypodermique et de base pourraient collaborer à une imprécision minime des résultats.
- On remarque aussi qu'après un temps de décrue égal au temps de crue et avec le même taux de variation du débit, les limites de l'eau avec les bords ne retournent pas à la position initiale avant le lancement de la simulation. Ceci est justifié par le besoin des eaux débordées à un temps de réponse supplémentaire pour que la dernière goutte d'eau débordée soit retournée dans l'affluent. De plus, les débits latéraux provenant de l'eau débordée servent à assurer un ajout au débit de l'affluent.
- La subdivision polygonale adoptée dans cette recherche nous a permis de tracer en fonction du temps un profil de vitesse pour chacune des six directions dont le centre du polygone forme toujours un point des deux extrémités qui limitent les lignes d'écoulement. À titre de démonstration, on montre dans les graphes suivants les profils des vitesses dans le polygone P12 du bord gauche.







NB: les vitesses V5 et V6 ont le même profil car elles se partagent la même ligne d'écoulement.

CHAPITRE 5

APPLICATION SUR LA RIVIÈRE SAINTE MARGUERITE

5.1 Présentation du cas

La comparaison des résultats produits par deux types d'application était nécessaire pour évaluer la fiabilité de la méthode proposée. Il s'agit de deux simulations faites sur le cas de la rivière Sainte Marguerite en aval de la centrale hydroélectrique de Sainte Marguerite-1. À noter que les données topographiques et hydrauliques sont fournies par Hydro-Quebec. La rivière se termine sur le bord du Golf de la Gaspé dans la province du Québec. La première application est exécutée par le logiciel TELEMAT, dont le mode de calcul est toujours bidimensionnel, et la deuxième est effectuée suivant l'approche proposée par cette étude qui couple le mode unidimensionnel dans le cours d'eau avec le mode bidimensionnel dans l'analyse de débordement.

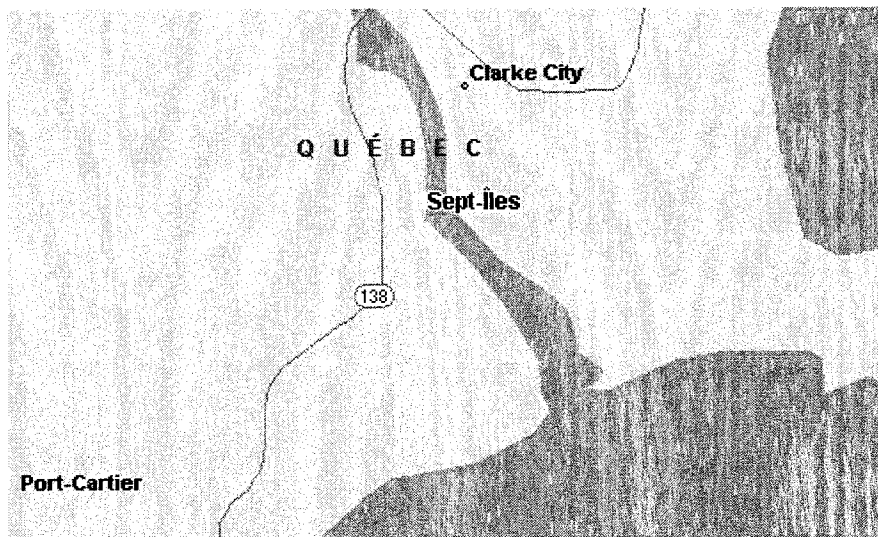


Figure 5,1: Région de la rivière Sainte Marguerite

5.2 Données et paramètres de la simulation

La région étudiée présente une topographie diversifiée, on y trouve une partie plate, mais aussi une autre montagneuse avec des pentes raides. Cette

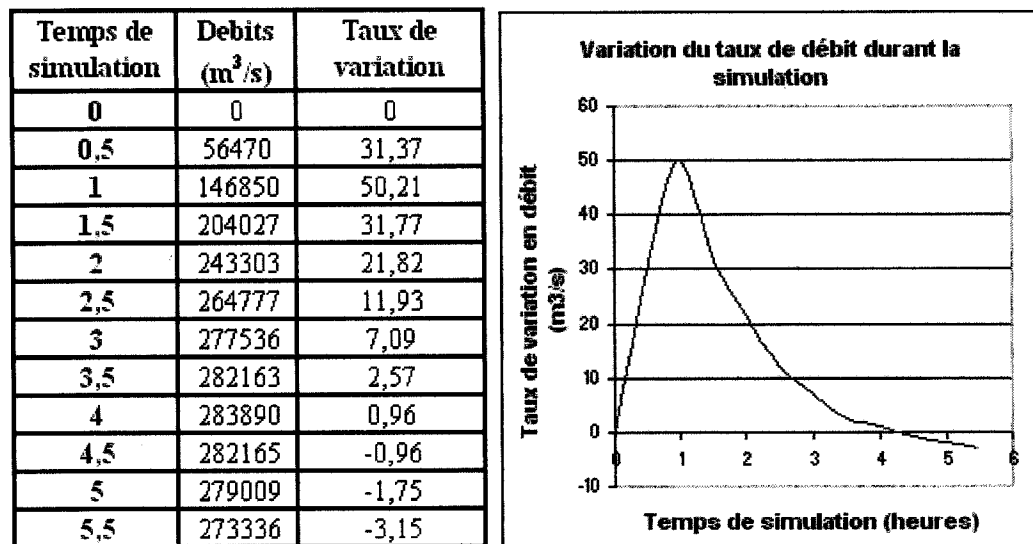
nature permettra de générer une sorte d'îlots terrestres et des dérivations d'eau durant la crue.



Figure 5,2: Reliefs topographiques de la zone analysée

Le temps de simulation faite par TELEMAC est de 8.32 heures. Au cours des premiers 2.85 heures l'application reste à sec. C'est pourquoi, dans la simulation faite selon la méthode de ce mémoire, on a exclu cette durée pour garder une période de 5.5 heures qui est le temps qui présente un changement de débit dans l'écoulement.

Les variations de débits en amont de la région étudiée se montrent dans le tableau suivant :



Un point de pollution était implanté sur le bord gauche de l'écoulement afin de modéliser les limites de l'eau affectée par cette source de pollution. Le but de cette supposition est de montrer la fiabilité de la simulation de propagation des agents polluants selon la méthode donnée par cette recherche.

Les propriétés physico-chimiques du polluant sont les hypothèses les suivantes :

- Le coefficient de diffusion moléculaire $D_0 = 2 \text{ (m}^2/\text{s)}$;
- Le coefficient de la diffusion due à la turbulence $c = 0.16 \text{ (m}^2/\text{s)}$.

Les points de maillage utilisés dans TELEMAC sont équidistants et sont séparés de 50 mètres entre eux. C'est pourquoi, on a espacé les axes de la subdivision polygonale de la même distance afin d'éviter les facteurs qui peuvent affecter la précision de comparaison entre les deux modes de simulation. En plus, la région découpée afin d'être sujette à la simulation commence à une distance d'environ 2Km de la centrale hydroélectrique vers

le golf du Saint Laurent, et ceci pour éviter le plus possible les effets dynamiques produites par la turbulence de l'écoulement en aval de la chute.

5.3 Résultats des simulations

On présentera dans cette partie du chapitre le déroulement et les résultats de la simulation selon la méthode proposée par ce mémoire et aussi les résultats obtenus par la simulation avec TELEMAC.

5.3.1 Résultats de la méthode de cette étude

En premier, on a adopté un repère local pour identifier les coordonnées des points de maillage générés par la méthode de la subdivision polygonale. Ensuite, le profil longitudinal de la rivière est identifié à travers les cinq sections transversales dont deux sont situées aux extrémités de la zone analysée et trois sont réparties respectivement à 2.1Km, 3.28Km et 4.32Km de la première section.

À noter que les niveaux des points sont déduits par interpolation linéaire entre les niveaux des courbes d'altitudes fournies sur la carte de la région. Ainsi le coefficient de rugosité donnée dans le calcul ($n = 0.035$) correspond à une surface des matériaux fins avec une herbe haute.

Vue la topographie de la région, le débit passant par la première section, située en amont du domaine analysé, sera diminué par le fait de la présence des dérivations naturelles qui servent à évacuer une partie de ce débit à travers une ligne d'écoulement secondaire résultant sur le bord gauche de la rivière.

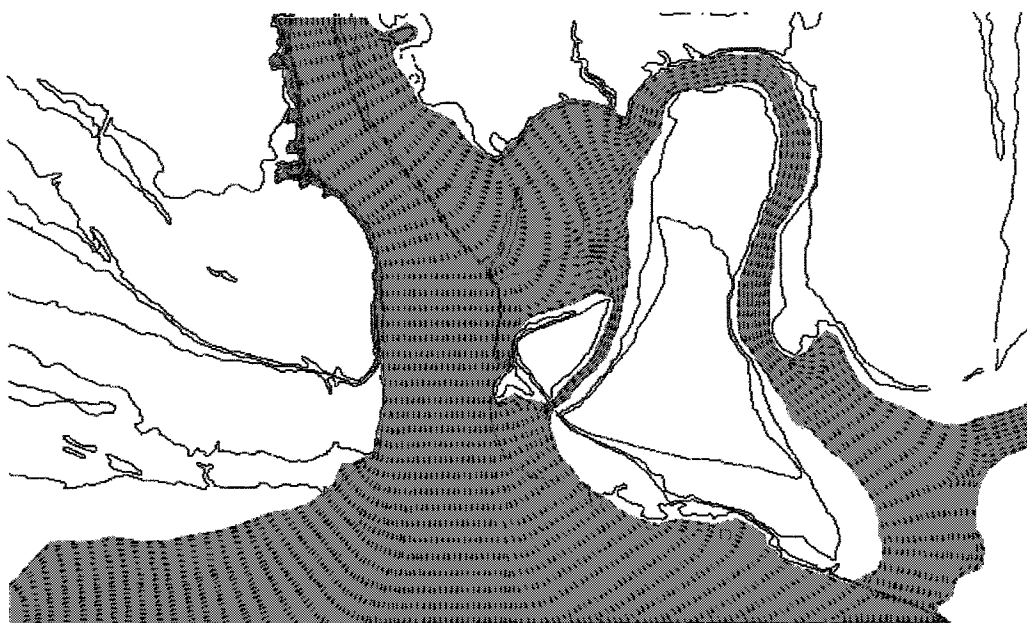


Figure 5,3: Directions des lignes d'écoulement après 1.5 h de la simulation

Afin de montrer le développement de la simulation en fonction de la variation du débit, on montrera dans les figures ci-dessous les limites de l'eau sur les bords inondés après 1.5 h, 4h et 5.5h avec les lignes de profondeur 5, 10, 20, 30, 40 et 50m.

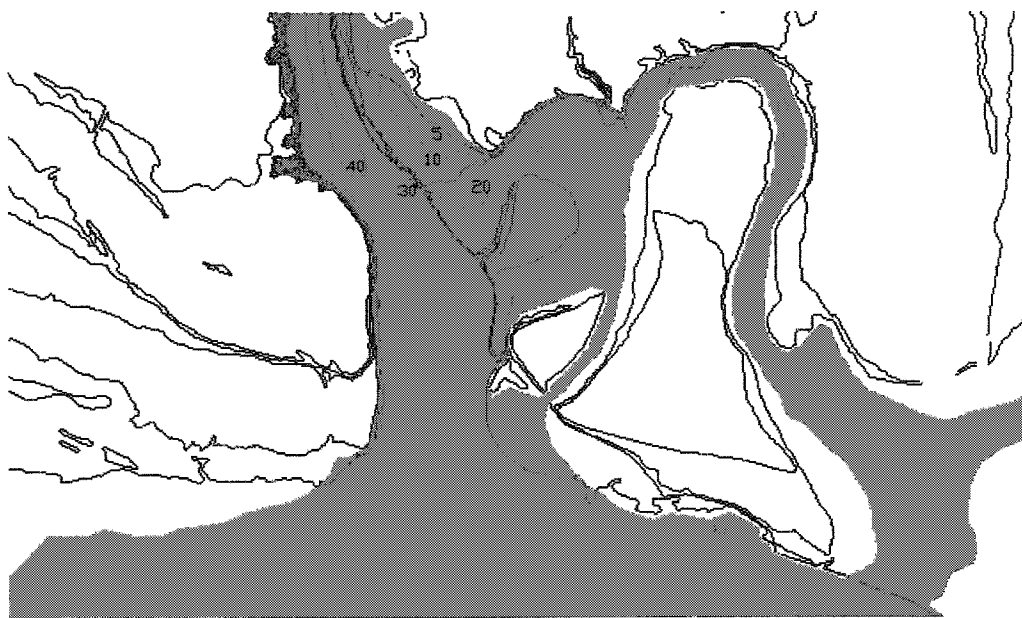


Figure 5,4: Limite de débordement après 1.5 h

Les lignes tracées à l'intérieur de la zone d'inondation représentent les courbes de profondeur (5m, 10m, 20, 30m et 40 m).

À cause de la condition qu'on a proposée dans les codes, le niveau en aval de la zone simulée reste inchangé surtout que l'effluent de la rivière est un océan qui peut absorber ces grandes quantités d'eau sans faire de changement considérable dans son profil vertical. Cette hypothèse n'est pas tenue compte dans TELEMAC, ce qui pourrait créer une petite différence de résultats à cette hauteur.

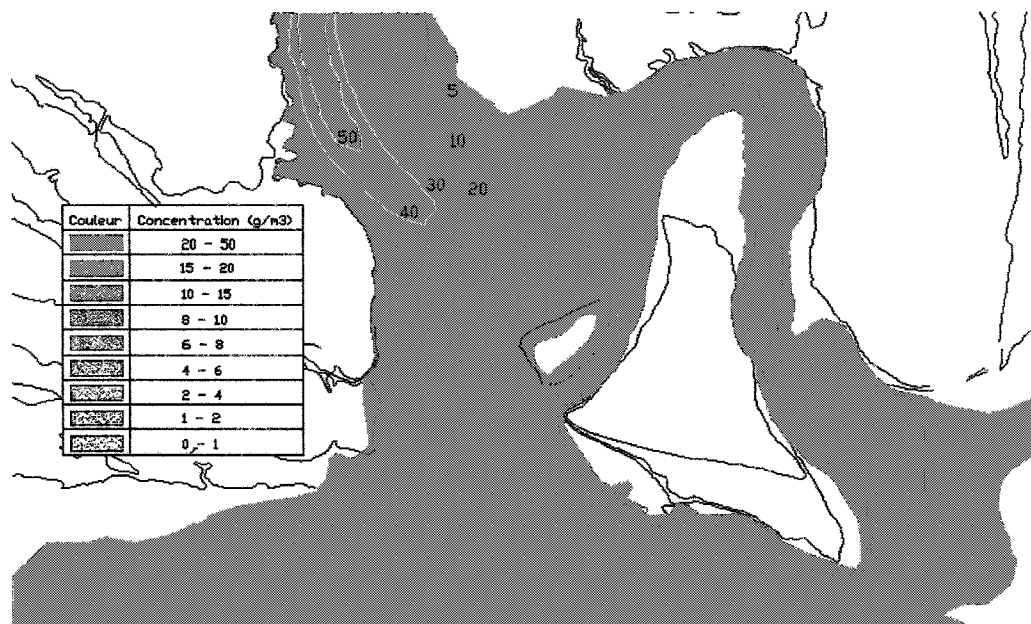


Figure 5,5: Limite de l'eau sur les bords inondés après 4 h

Quant à la pollution causée par le point source situé sur le bord gauche, les limites de la propagation de pollution sont largement influencées par les directions de l'écoulement car dans le cas présent, la transmission due à l'écoulement est plus grande que celle effectuée par la diffusion moléculaire.

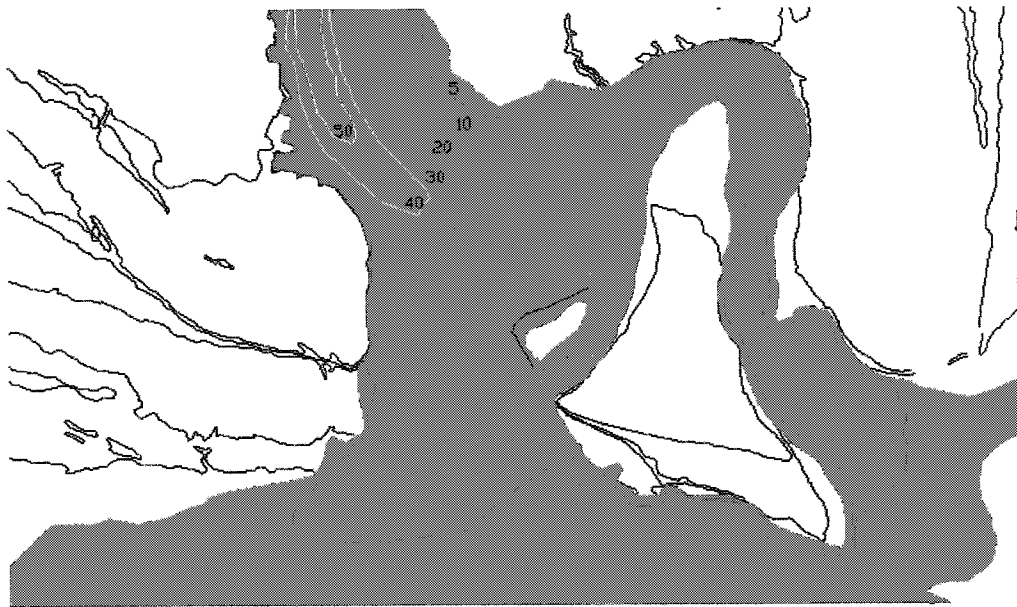


Figure 5,6: Limite de l'eau polluée sur les bords inondés après 5.5 h

5.3.2 Résultats de TELEMAC

La simulation faite par TELEMAC couvre une partie de la rivière de longueur 115540 m, mais grâce à la nature topographique du canal d'écoulement, le grand débordement commence à une distance de quelques kilomètres en amont de la centrale hydroélectrique Sainte Marguerite-2.

Les limites maximales de l'inondation dans la zone analysée par les deux modes de calcul sont présentées dans la figure suivante.

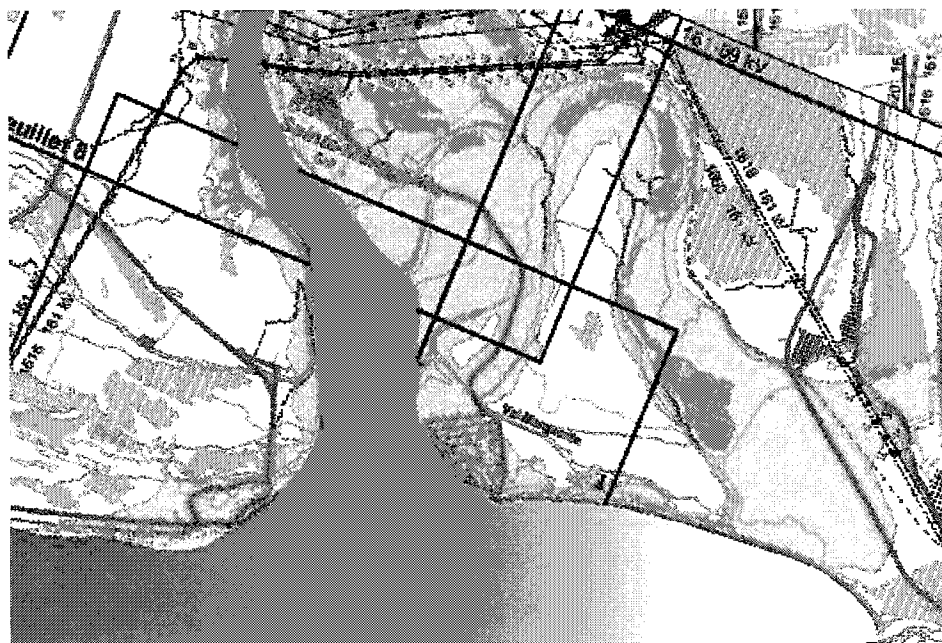


Figure 5,7: Résultats de la simulation (5.5 h) faite par TELEMAC

À rappeler que le mode de calcul adopté par ce logiciel est bidimensionnel; les effets dynamiques sont considérés dans le canal de l'écoulement initial et dans les écoulements de débordement. D'où l'importance de la comparaison des résultats produits par ce type de calcul et celui proposé par cette étude.

5.4 Comparaison et Interprétation des deux Résultats

L'évaluation de la méthode proposée par rapport à celle de TELEMAC est traitée à deux niveaux : le premier est caractérisé par la comparaison entre les limites de l'inondation produite et le deuxième porte sur la comparaison entre les variations des niveaux d'eau aux mêmes périodes du temps et aux mêmes sections transversales qui sont déjà définies géométriquement comme données avant le lancement des simulations. Il s'agit de quatre sections dont les chaînages sont respectivement situés à 86970, 89070, 90250 et 91250m du point d'origine fixé dans les données fournies par Hydro-Quebec. À noter que la dernière section qui fait l'intersection de la rivière avec

le golf du Saint Laurent n'est pas sujette à la comparaison à cause de l'hypothèse de fixation de hauteur qu'on a supposé avant le lancement de la simulation de couplage entre l'analyse unidimensionnelle et bidimensionnelle.

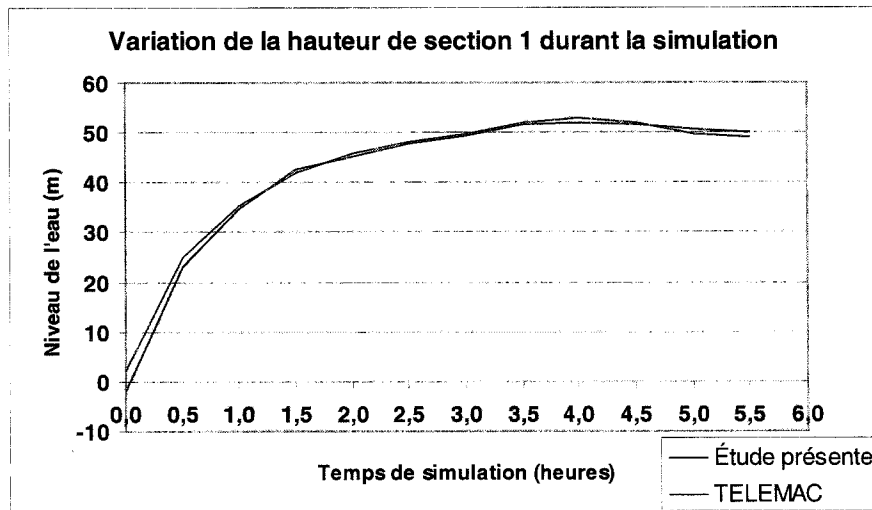


Figure 5,8: Résultats à la section 1 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h)

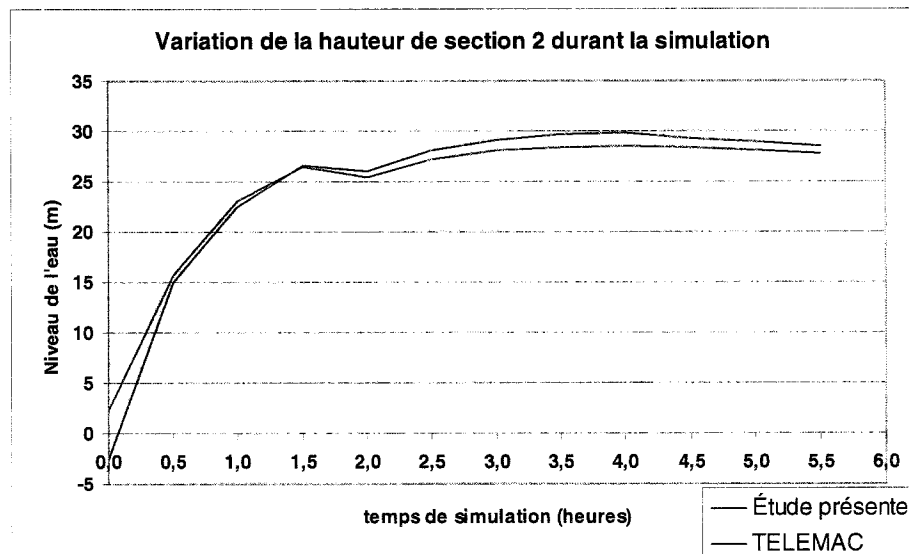


Figure 5,9: Résultats à la section 2 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h)

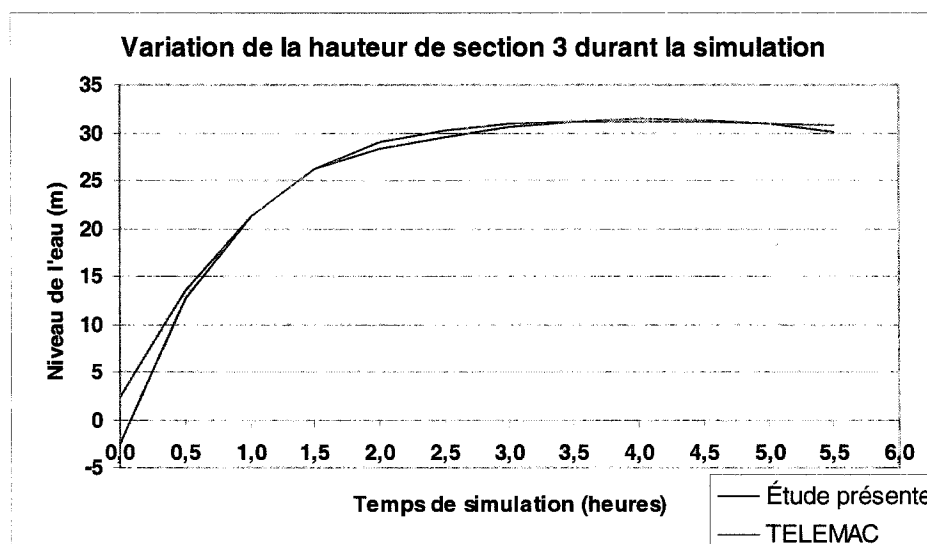


Figure 5,10: Résultats à la section 3 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h)

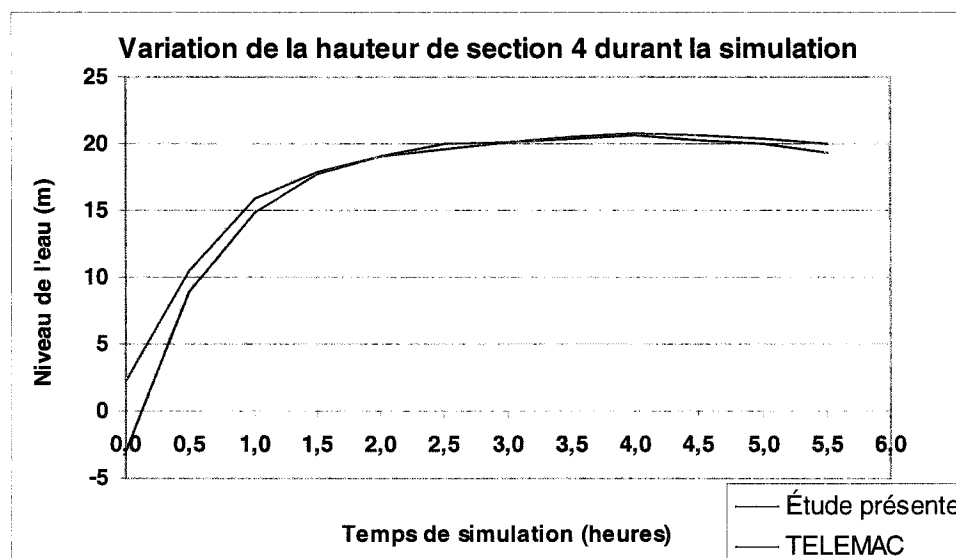


Figure 5,11: Résultats à la section 4 des deux modes de simulation (au cours de 5.5h)

Le développement des niveaux dans les mêmes sections verticales de l'écoulement montre une vraisemblance entre les résultats des deux types de simulations. Pourtant cette situation est différente à la hauteur de la dernière section car TELEMAC ne fixe pas le niveau en ce point.

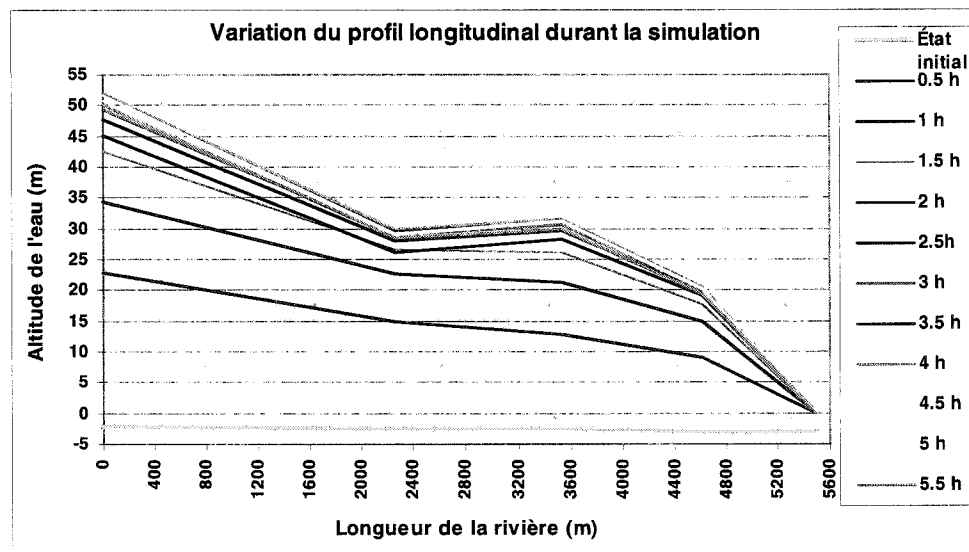


Figure 5,12: Variation de la ligne d'eau au cours de la simulation

Le graphe ci-dessus montre une présentation complète du profil longitudinal de la tranche analysée au cours du temps de la simulation faite selon la méthode de l'étude.

Quant au développement du niveau d'eau aux centres de polygones générés par la subdivision des aires de bords, on remarque que le parcours des courbes se diffère en fonction du temps de réponse nécessaire qui sépare le point correspondant situé au dessus de l'axe de la rivière et le centre du polygone en analyse.

On prendra comme exemple le centre du polygone qu'on a proposé comme source de pollution et qui est localisé sur le bord gauche de la rivière entre le chaînage de la deuxième et troisième section. On montrera dans les deux prochains graphes la variation de niveau de ce polygone et la comparaison avec les niveaux des sections 2 et 3.

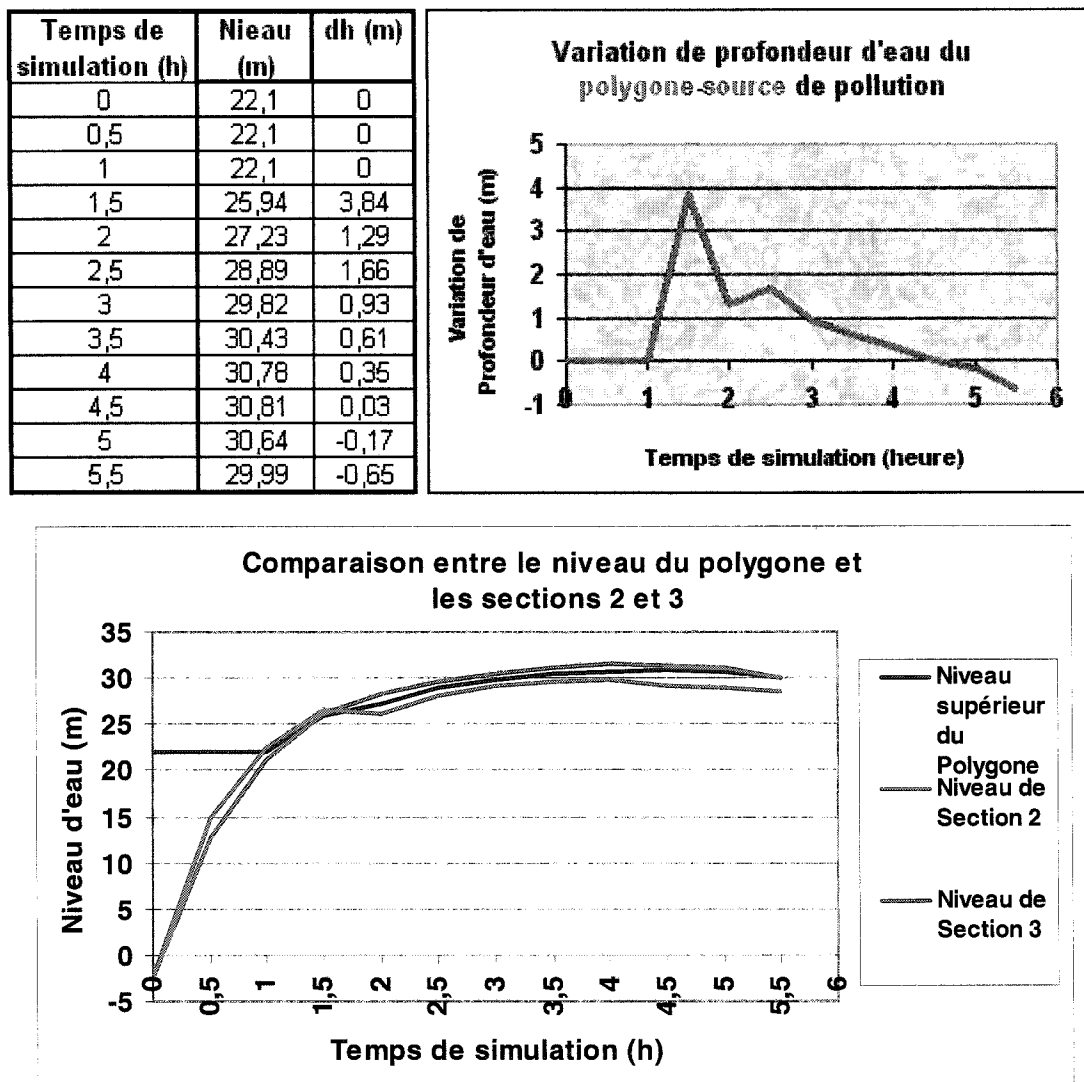


Figure 5,13: Développement du niveau d'eau dans le polygone-source de pollution par rapport aux sections 2 et 3 (au cours de 5.5h)

En résumé et à la lumière des résultats obtenus, le mode de calcul présenté par cette recherche nous offre un moyen fiable dans le cas des modélisations où les effets dynamiques sont faibles. À noter qu'une différence pourrait être reflétée entre les deux résultats si on avait commencé le domaine de la simulation directement en amont de la centrale de Sainte Marguerite-2, et celle-ci découle de l'intervention efficace de la turbulence

dans l'écoulement à cette position. Dans la même optique, on remarque une différence minime dans le développement du niveau de la section 2 à cause de l'élargissement néanmoins brusque dans le profil vertical de la rivière en ce point.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'analyse du comportement de l'eau sur les bords d'un écoulement durant la crue et la décrue. Cette analyse évalue, en même temps, la propagation des agents polluants dans l'eau inondée. Bien que le domaine de la méthode présentée est limité dans le cadre d'une topographie plate à cause de l'application des formules destinées à calculer les écoulement à pente faible, elle offre la possibilité de simuler les deux problèmes d'une façon bien structurée et simple à appliquer.

Quant au mode de calcul, il est indispensable de noter que la méthode serait améliorée avec l'intervention des paramètres générés par quelques conséquences et qui peuvent affecter le mouvement hydraulique sur les bords. On citera l'effet de l'érosion, l'infiltration ou l'écoulement de base et le transport des sédiments. Ces éléments, qui se diffèrent en fonction des propriétés géotechniques du sol submergé, peuvent clairement affecter les paramètres hydrauliques et aussi favoriser la propagation des polluants à cause du changement de la viscosité d'eau et de la contrainte tangentielle créée sur la surface du fond.

En ce qui concerne la propagation des polluants, la méthode ne tient compte qu'un seul type de polluant par simulation. Ceci pourrait limiter la possibilité de l'exécution dans les régions où se trouvent plusieurs types des agents polluants sur les bords du cours d'eau (ex: un fleuve qui traverse une zone industrielle).

Sur le plan analytique, on trouve que l'approche de la subdivision polygonale a permis d'approcher, de plus en plus, le comportement naturel de l'eau avec celui de la simulation; cette approximation est due à la multi-direction d'écoulement générée par la forme hexagonale suivie dans la subdivision. Ces différentes directions nous ont donné la possibilité

d'engendrer un spectre circulaire des mouvements d'eau et de polluant autour de chaque point du maillage. Ce dernier représente les points d'intersection entre les axes tracés selon les hypothèses expliqués dans la méthode proposée par cette étude.

L'application de ce mode de calcul sur le modèle type et le cas de la rivière Sainte Marguerite a présenté une fiabilité considérable par rapport à la sensibilité et à la précision des résultats. Avec les résultats qu'on peut obtenir par les codes de programmation, on peut présenter graphiquement les limites de l'eau avec les bords, le développement des paramètres hydrauliques à chaque point de maillage et aussi à chaque section transversale de l'écoulement initial. De même, on peut visualiser la concentration des agents polluants dans chaque polygone et le développement des niveaux d'eau à chaque centre de polygone.

Enfin, les recherches scientifiques et techniques ne se terminent jamais. C'est pourquoi, le progrès dans tous les domaines reste toujours possible. Dans cette optique, on trouve que la méthode développée, dans le cadre de cette étude, présente une amélioration importante par rapport aux précédentes modélisations numériques en 2D. D'une part, elle nous permet de modéliser un incident de crue et de propagation des polluants avec un comportement très proche de la réalité et d'autre part, elle forme une méthode de base aux recherches futures pour intervenir les autres paramètres hydrauliques dans le calcul, comme l'infiltration et l'érosion, qui pourraient assurer une précision et une résolution meilleures des résultats obtenus.

BIBLIOGRAPHIE

- AKHILESH KUMAR JHA, JUICHIRO AKIYAMA, AND MASARU URA: "Flux-Difference Splitting Schemes for 2D Flood Flows", Journal of Hydraulic / January 2000, pp. 33 - 42.
- BUIL N. [1999]: Thèse de doctorat "Modélisation tridimensionnelle du transport des polluants dans les écoulements à surface libre" Chap. 2, pp. 50 - 53, Université de Claude Bernard - Lyon 1, Division Hydrologie - Hydraulique, unité de recherche.
- BUJON G. [1983]: "Modélisation de la dispersion des substances solubles ou pseudo-solubles dans un cours d'eau. Application au cas de la seine à l'amont de Paris" - La Houille Blanche No. 1 - pp. 45 - 53.
- CALEFFI V., VALIANI A., AND ZANNI A. [2003]: "Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels", Journal of Hydraulic Research Vol. 41, No. 2 (2003), pp. 167-177.
- CASULLI V. & STELLING G.S [1998]: "Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free surface flows" - Journal of Hydraulic Engineering - No. 7, Vol 124, pp. 678 - 686.
- CLINE A.K. AND RENKA R.L. [1984]: University of North Texas, "A storage efficient method for construction of a Thiessen triangulation, Rocky Mountain", pp. 119 – 140.
- CUNGE J.A., HOLLY JR F.M. & VERWEY A, "Practical Aspects of computational River Hydraulics", pp. 13-21 et pp. 54-72.
- FAN Y., KAHAWITA R., TESSIER J.C. "Numerical study of the effects of a variable density contaminant plume in an unconfined aquifer" - Department of Civil Engineering, École Polytechnique de Montréal, pp. 165-171.
- GARCIA R., KAHAWITA R., "Numerical solution of the St. Venant equations with the Mac Cormack finite difference scheme" Int. J. Numer. Methods in Fluids, Vol.6, 1986, 507-527.

GREEN, P.J. AND SIBSON, R. [1978]: "Computing Dirichlet tessellations in the plane", The Computer Journal, pp. 21-168.

JANIN J.M., LEPEINTRE F. & PECHON P. [1992]: "TELEMAC 3D, A finite element code to solve 3D free surface flow problems" - Laboratoire National d'hydraulique d'EDF - DER Report 93NV00001 -21p.

MINGHAM C.G., CAUSON D.M.: "High-resolution finite-volume method for shallow water flows." JHE, Vol. 124(6), 1998, 605-614.

RAJAR R. & CETINA M. [1997]: "Hydrodynamic and water quality modelling: An experience" -Ecological Modelling 101 - pp. 195-207.

RENKA R.L. [1984]: Algorithm 624 - "Triangulation and interpolation at arbitrarily distributed points in the plane" ACM Transactions on Mathematical software, 10, 440.

RIGAUDIÈRE P. [1992]: "Simulations de transferts de pollution sur le Cher" - Rapport CEMAGREF LYON / DIREN / CERGRENNE - pp. 58.

SIMON L. (a) [1990] : "Évaluation de schémas numériques pour la modélisation de l'advection-dispersion" - La Houille Blanche - No. 3 - pp. 225-230.

SIMON L. (b) [1990] : "Modèle Hydraulique Bidimensionnel" -PIREN SEINE Groupe 4 "Orages" - pp. 58.

SLOAN S.W. [1987]: "A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane" Department of Civil Engineering and Surveying, the university of Newcastle, NSW 2308, Australia. Computational Mechanics Publications. pp. 34- 53.

SITES CONSULTÉS:

www.iquebec.ifrance.com/kadchakib/chap4/chap4.com

www.fao.org/docrep/W2570F/w2570f06.htm

Annexes

Annexe A

Valeurs du coefficient de rugosité (Manning) n :

Type de cours d'eau		Coefficient n
Lit taillé dans la roche:		
1 lisse et uniforme		0,025-0,040
2 déchiqueté et irrégulier		0,035-0,050
Lit constitué de matériaux fins:		
1 propre sans végétation		0,018-0,025
2 avec une herbe courte		0,025-0,033
3 avec une herbe haute		0,030-0,050
Lit constitué de matériaux grossiers:		
1 graviers	4- 8 mm	0,019-0,020
2 graviers	8- 20 mm	0,020-0,022
3 graviers	20- 60 mm	0,022-0,027
4 cailloux et galets	60-110 mm	0,027-0,030
5 cailloux et galets	110-250 mm	0,030-0,035
6 grosses pierres (suivant la taille)		0,035-0,070
Berges et/ou lit majeur avec:		
1 herbes ou cultures basses (suivant la densité)		0,030-0,050
2 broussailles (suivant la densité)		0,050-0,100
3 arbres (suivant la densité)		0,075-0,100

Annexe B

Abscisse	Coordonnées des limites initiales d'eau avec les bords à t=0		Coordonnées des limites d'eau avec les bords après 2h de crue ($\Delta Q = +0,5 \text{ m}^3/\text{s}$)	
	Y(bord gauche)	Y(bord droit)	Y(bord gauche)	Y(bord droit)
1400	3500	2200	3647,25772	2052,74228
1700	3350	2050	3484,65658	1915,34342
2000	3300	2050	3580,57268	1806,25216
2300	3300	2100	3497,91858	1952,08142
2600	3450	2250	3742,21068	1957,78932
2900	3500	2250	3865,35015	1884,64985
3200	3500	2300	3914,67509	1785,32491
3500	3350	2050	3350	2050

Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord gauche après 2 heures de crue								Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord droite après 2 heures de crue							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
0	50	0	0	0	0	50	0	0	50	0	0	0	0	50	0
0	0	14,01	50	50	50	13,95	0	0	0	6,74	50	16,4	50	3,26	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

État des sections après 2 heures de crue avec un taux de croissance du débit en amont ($\Delta Q = +0,5 \text{ m}^3/\text{s}$):

État de la section	Distance de l'amont	Élévation	Niv. Fond	Profondeur	Surface	Périmètre	Largeur	Vitesse	Froud	Décharge en long.	Décharge latérale
1	0,00E+00	202,7318	1,99E+02	3,83E+00	2,62E+04	3,69E+03	1,62E+03	1,89E-01	1,50E-02	4,95E+03	0,00E+00
2	3,00E+02	202,5028	1,99E+02	3,90E+00	2,11E+04	3,53E+03	1,30E+03	2,34E-01	1,85E-02	4,94E+03	-1,59E+01
3	6,00E+02	202,8986	1,99E+02	4,40E+00	1,50E+04	3,54E+03	1,77E+03	2,58E-01	2,83E-02	3,86E+03	-5,70E+01
4	9,00E+02	202,8971	1,98E+02	4,50E+00	3,25E+03	3,35E+03	1,67E+03	7,44E-01	1,70E-01	2,42E+03	-6,56E+01
5	1,20E+03	202,8673	1,98E+02	4,57E+00	3,07E+03	3,45E+03	1,73E+03	8,01E-01	1,92E-01	2,46E+03	-2,28E+01
6	1,50E+03	202,6139	1,98E+02	4,41E+00	2,77E+03	2,85E+03	1,43E+03	7,86E-01	1,80E-01	2,18E+03	-1,92E+01
7	1,80E+03	202,8111	1,98E+02	4,91E+00	3,35E+03	3,39E+03	1,70E+03	7,53E-01	1,71E-01	2,52E+03	-4,16E+01
8	2,10E+03	202,29	1,98E+02	4,49E+00	2,95E+03	2,69E+03	1,34E+03	3,42E-01	7,38E-02	1,01E+03	0,00E+00

Annexe C

Abscisse	Coordonnées des limites initiales d'eau avec les bords à t=0		Coordonnées des limites d'eau avec les bords après 4h de crue ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)	
	Y(bord gauche)	Y(bord droit)	Y(bord gauche)	Y(bord droit)
1400	3500	2200	3642,07383	2042,03185
1700	3350	2050	3551,98245	1895,79738
2000	3300	2050	4349,59638	1582,7837
2300	3300	2100	3925,73997	1637,83287
2600	3450	2250	4008,0982	1743,18987
2900	3500	2250	3921,31045	1691,9018
3200	3500	2300	3987,54362	1528,68955
3500	3350	2050	3350	2050

Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord gauche après 4 heures de crue								Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord droite après 4 heures de crue							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
0	50	0	0	0	0	50	0	0	50	0	0	0	50	0	0
0	50	30,41	50	50	50	28,09	0	0	4,01	7,36	50	26,7	50	13,9	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

État des sections après 4 heures de crue avec un taux de croissance du débit en amont ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$):

État de la section	Distance de l'amont	Élévation	Niv. Fond	Profondeur	Surface	Périmètre	Largeur	Vitesse	Froud	Décharge en long.	Décharge latérale
1	0,00E+00	202,5033	1,99E+02	3,27E+00	1,27E+04	3,69E+03	1,07E+03	6,75E-01	6,26E-02	8,55E+03	0,00E+00
2	3,00E+02	202,5028	1,99E+02	3,90E+00	1,54E+04	3,53E+03	1,30E+03	6,65E-01	6,18E-02	1,02E+04	8,97E+00
3	6,00E+02	202,8986	1,99E+02	4,40E+00	3,12E+04	3,54E+03	1,77E+03	3,36E-01	2,55E-02	1,05E+04	-1,12E+01
4	9,00E+02	202,8971	1,98E+02	4,50E+00	1,12E+04	3,35E+03	1,67E+03	9,18E-01	1,13E-01	1,03E+04	-3,18E+01
5	1,20E+03	202,8995	1,98E+02	4,60E+00	1,11E+04	3,53E+03	1,77E+03	9,18E-01	1,17E-01	1,02E+04	-2,66E+01
6	1,50E+03	202,8973	1,98E+02	4,70E+00	1,01E+04	3,43E+03	1,71E+03	9,98E-01	1,31E-01	1,01E+04	-6,30E+01
7	1,80E+03	202,8961	1,98E+02	5,00E+00	5,79E+03	3,57E+03	1,78E+03	1,63E+00	2,88E-01	9,42E+03	-9,61E+01
8	2,10E+03	202,29	1,98E+02	4,49E+00	2,95E+03	2,69E+03	1,34E+03	3,46E+00	7,45E-01	1,02E+04	0,00E+00

Annexe D

Abscisse	Coordonnées des limites initiales d'eau avec les bords à t=0		Coordonnées des limites d'eau avec les bords après 6h de crue ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)	
	Y(bord gauche)	Y(bord droite)	Y(bord gauche)	Y(bord droit)
1400	3500	2200	3669,04155	1936,463
1700	3350	2050	3720,26675	1861,9018
2000	3300	2050	4397,73732	1323,63452
2300	3300	2100	4005,61631	1340,90164
2600	3450	2250	4056,22817	1399,36919
2900	3500	2250	4122,51646	1428,68955
3200	3500	2300	4110,29494	1383,2596
3500	3350	2050	3350	2050

Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord gauche après 6 heures de crue								Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord droite après 6 heures de crue							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
0	50	0	0	0	0	50	0	0	50	0	0	0	0	50	0
0	50	25,63	50	50	50	26,23	0	0	4,73	7,19	50	17,7	50	11,7	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

État des sections après 6 heures de crue avec un taux de croissance du débit en amont ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$):

État de la	Distance de	Élévation	Niv. Fond	Profondeur	Surface	Périmètre	Largeur	Vitesse	Froud	Décharge en long.	Décharge latérale
1	0,00E+00	202,7199	1,99E+02	3,82E+00	8,56E+03	3,69E+03	1,60E+03	9,98E-01	1,38E-01	8,54E+03	0,00E+00
2	3,00E+02	202,5028	1,99E+02	3,90E+00	7,15E+03	3,53E+03	1,30E+03	1,19E+00	1,62E-01	8,54E+03	9,38E+00
3	6,00E+02	202,8986	1,99E+02	4,40E+00	3,13E+04	3,54E+03	1,77E+03	2,68E-01	2,04E-02	8,38E+03	-8,44E+00
4	9,00E+02	202,8971	1,98E+02	4,50E+00	1,37E+04	3,35E+03	1,67E+03	6,05E-01	6,74E-02	8,29E+03	-2,79E+01
5	1,20E+03	202,8995	1,98E+02	4,60E+00	1,03E+04	3,53E+03	1,77E+03	8,03E-01	1,06E-01	8,24E+03	-2,52E+01
6	1,50E+03	202,8973	1,98E+02	4,70E+00	1,11E+04	3,43E+03	1,71E+03	7,39E-01	9,25E-02	8,22E+03	-6,32E+01
7	1,80E+03	202,8961	1,98E+02	5,00E+00	5,30E+03	3,57E+03	1,78E+03	1,51E+00	2,79E-01	8,00E+03	-9,61E+01
8	2,10E+03	202,29	1,98E+02	4,49E+00	2,95E+03	2,69E+03	1,34E+03	2,92E+00	6,30E-01	8,62E+03	0,00E+00

Annexe E

Abscisse	Coordonnées des limites initiales d'eau avec les bords à t=0		Coordonnées des limites d'eau avec les bords après 8 heures; 6h de crue ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) et 2h de décrue ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)	
	Y(bord gauche)	Y(bord droit)	Y(bord gauche)	Y(bord droit)
1400	3500	2200	3637,26424	2095,06251
1700	3350	2050	3586,26945	1896,55193
2000	3300	2050	4318,02008	1383,68965
2300	3300	2100	3854,37335	1473,04947
2600	3450	2250	3989,29724	1449,36919
2900	3500	2250	4021,31045	1448,60955
3200	3500	2300	4058,0982	1431,9018
3500	3350	2050	3350	2050

Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord gauche après 6 heures de crue suivies par 2 heures de décrue								Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord droite après 6 heures de crue suivies par 2 heures de décrue							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
0	0	50	50	50	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0
0	50	50	0	0	0	50	0	0	50	0	0	0	50	0	0
0	50	26,09	50	50	50	26,2	0	0	4,627	7,228	50	13,36	50	11,63	0
24,95	50	36,54	5,605	3,094	1,797	0,367	1,482	16,09	4,871	4,132	1,407	3,465	1,946	0,28	0,87
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

État des sections après 6 heures de crue avec ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) suivie par 2 heures de décrue ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$):

État de la	Distance de	Élévation	Niv. Fond	Profondeur	Surface	Périmètre	Largeur	Vitesse	Froud	Décharge en long.	Décharge latérale
1	0,00E+00	202,5511	1,99E+02	3,65E+00	6,66E+03	3,69E+03	1,37E+03	1,82E+00	2,64E-01	1,22E+04	0,00E+00
2	3,00E+02	202,5028	1,99E+02	3,90E+00	6,38E+03	3,53E+03	1,30E+03	1,92E+00	2,77E-01	1,23E+04	6,24E+00
3	6,00E+02	202,8986	1,99E+02	4,40E+00	3,03E+04	3,54E+03	1,77E+03	4,19E-01	3,23E-02	1,27E+04	-1,19E+01
4	9,00E+02	202,8971	1,98E+02	4,50E+00	1,35E+04	3,35E+03	1,67E+03	9,34E-01	1,05E-01	1,26E+04	-2,88E+01
5	1,20E+03	202,8935	1,98E+02	4,60E+00	1,08E+04	3,53E+03	1,77E+03	1,17E+00	1,51E-01	1,26E+04	-2,60E+01
6	1,50E+03	202,8973	1,98E+02	4,70E+00	1,17E+04	3,43E+03	1,71E+03	1,07E+00	1,30E-01	1,25E+04	-6,34E+01
7	1,80E+03	202,8961	1,98E+02	5,00E+00	7,48E+03	3,57E+03	1,78E+03	1,62E+00	2,52E-01	1,21E+04	-9,61E+01
8	2,10E+03	202,29	1,98E+02	4,49E+00	2,95E+03	2,69E+03	1,34E+03	4,80E+00	1,03E+00	1,41E+04	0,00E+00

Annexe F

Abscisse	Coordonnées des limites initiales d'eau avec les bords à t=0		Coordonnées des limites d'eau avec les bords après 10 heures, 6h de crue ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) et 4h de décrue ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)		
	Y(bord gauche)	Y(bord droit)	Y(bord droit)	(X) bord gauche	Y(bord gauche)
1400	3500	2200	2126,28768	1400	3578,0936
1700	3350	2050	1927,1755	1700	3489,48824
2000	3300	2050	1453,16723	1700	3556,26945
2300	3300	2100	1717,33735	2000	4250,45628
2600	3450	2250	1509,36919	2300	3755,66828
2900	3500	2250	1687,5437	2300	3755,66828
3200	3500	2300	1482,68879	2600	3876,34249
3500	3350	2050	2050	2900	3927,31121
				3200	3962,4563
				3500	3350

Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord gauche après 6 heures de crue suivies par 4 heures de décrue								Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord droit après 6 heures de crue suivies par 4 heures de décrue							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
0	0	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
0	50	50	0	0	0	50	0	0	50	0	0	0	50	0	0
0	50	25,04	50	50	50	24,88	0	0	4,953	7,84	50	15,2	50	12,7	0
26,24	50	50	7,496	3,823	4,998	0,325	1,749	17,63	4,88	4,5	1,45	2,676	9,261	8,328	1,849
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

État des sections après 6 heures de crue avec ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) suivie par 4 heures de décrue ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$):

État de la	Distance de	Élévation	Niv. Fond	Profondeur	Surface	Périmètre	Largeur	Vitesse	Froud	Décharge en long.	Décharge latérale
1	0,00E+00	202,5559	1,99E+02	3,66E+00	1,72E+04	3,69E+03	1,38E+03	2,87E-01	2,59E-02	4,94E+03	0,00E+00
2	3,00E+02	202,5028	1,99E+02	3,90E+00	1,63E+04	3,53E+03	1,30E+03	2,80E-01	2,53E-02	4,55E+03	9,84E+00
3	6,00E+02	202,7986	1,99E+02	4,40E+00	4,37E+04	3,54E+03	1,77E+03	6,85E-02	4,40E-03	2,99E+03	-8,97E+00
4	9,00E+02	202,7971	1,98E+02	4,50E+00	1,31E+04	3,35E+03	1,67E+03	2,01E-01	2,30E-02	2,63E+03	-3,98E+01
5	1,20E+03	202,7995	1,98E+02	4,60E+00	9,03E+03	3,53E+03	1,77E+03	3,04E-01	4,29E-02	2,74E+03	-1,64E+01
6	1,50E+03	202,7973	1,98E+02	4,70E+00	6,04E+03	3,43E+03	1,71E+03	5,52E-01	9,38E-02	3,33E+03	-3,59E+01
7	1,80E+03	202,7494	1,98E+02	4,85E+00	3,25E+03	3,27E+03	1,64E+03	1,21E+00	2,75E-01	3,95E+03	-8,09E+01
8	2,10E+03	202,29	1,98E+02	4,49E+00	2,95E+03	2,69E+03	1,34E+03	7,95E-01	1,71E-01	2,34E+03	0,00E+00

Annexe G

Abscisse	Coordonnées des limites initiales d'eau avec les bords à $t=0$		Coordonnées des limites d'eau avec les bords après 10 heures: 6h de crue ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) et 6h de décrue ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$)		
	Y(bord gauche)	Y(bord droit)	Y(bord droit)	(X) bord gauche	Y(bord gauche)
1400	3500	2200	2205,5741	1400	3528,0963
1700	3350	2050	1971,50302	1700	3419,01866
2000	3300	2050	1705,39626	2000	3745,46824
2300	3300	2100	1977,16225	2300	3588,16275
2600	3450	2250	1569,58458	2600	3754,44921
2900	3500	2250	1906,0348	2900	3823,9652
3200	3500	2300	1557,68912	3200	3842,31088
3500	3350	2050	2050	3500	3350
				1700	3556,26945
				2000	3888,61034
				2300	3755,66828
				2000	4250,45628
				1700	3556,26945

Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord gauche après 6 heures de crue suivies par 6 heures de décrue								Concentration en agent polluant (g/m^3) des volumes d'eau situés au-dessus des points du maillage sur le bord droite après 6 heures de crue suivies par 6 heures de décrue							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
0	0	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
0	50	50	0	0	0	50	0	0	50	0	0	0	50	0	0
0	50	40,09	50	50	50	29,76	0	0	5,819	3,119	50	4,93	50	29,04	0
27,39	50	50	20,18	35,5	50	23,84	8,336	18,44	5,456	5	12,82	31,49	50	23,57	7,925
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

État des sections après 6 heures de crue avec ($\Delta Q = +0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) suivie par 6 heures de décrue ($\Delta Q = -0.5 \text{ m}^3/\text{s}$):

État de la	Distance de	Élévation	Niv. Fond	Profondeur	Surface	Périmètre	Largeur	Vitesse	Froud	Décharge en long.	Décharge latérale
1	0,00E+00	202,5073	1,99E+02	2,03E+00	4,38E+02	9,09E+02	4,54E+02	3,07E+00	1,00E+00	1,35E+03	0,00E+00
2	3,00E+02	202,5028	1,99E+02	3,90E+00	3,46E+04	3,53E+03	1,30E+03	-4,48E-02	2,77E-03	-1,55E+03	0,00E+00
3	6,00E+02	202,6986	1,99E+02	4,40E+00	1,83E+04	3,54E+03	1,77E+03	-1,28E-02	1,27E-03	-2,34E+02	0,00E+00
4	9,00E+02	202,57	1,98E+02	3,86E+00	1,90E+03	2,16E+03	1,08E+03	-5,83E-03	1,40E-03	-1,11E+01	0,00E+00
5	1,20E+03	202,6995	1,98E+02	4,60E+00	5,01E+03	3,53E+03	1,77E+03	1,62E-03	3,08E-04	8,14E+00	2,13E+00
6	1,50E+03	202,5614	1,98E+02	4,06E+00	2,32E+03	2,37E+03	1,18E+03	1,55E-02	3,54E-03	3,60E+01	4,74E+00
7	1,80E+03	202,6951	1,98E+02	5,00E+00	3,81E+03	3,57E+03	1,78E+03	-3,96E-03	8,64E-04	-1,51E+01	5,22E+00
8	2,10E+03	202,29	1,98E+02	4,49E+00	2,95E+03	2,69E+03	1,34E+03	-6,26E-02	1,35E-02	-1,85E+02	0,00E+00